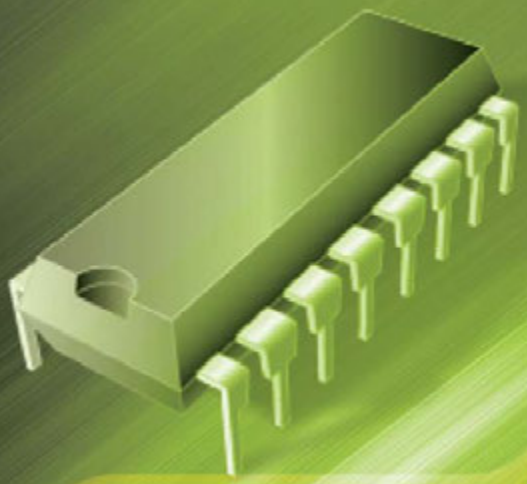
CF

GRADO MEDIO

CICLOS FORMATIVOS

R.D. 1538/2006

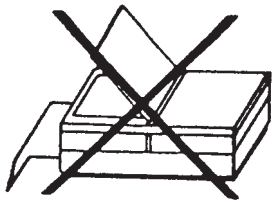
Electrónica



MARCOS GARCÍA LORENZO
PABLO HUERTA PELLITERO
CARLOS SÁNCHEZ DE LA LAMA
PABLO TOHARIA RABASCO

Ra-Ma®

www.ra-ma.es/cf



La ley prohíbe
Copiar o Imprimir este libro

ELECTRÓNICA
© Marcos García Lorenzo, Pablo Huerta Pellitero, Carlos Sánchez de la Lama, Pablo Toharia Rabasco

© De la Edición Original en papel publicada por Editorial RA-MA
ISBN de Edición en Papel: 978-84-9964-098-3
Todos los derechos reservados © RA-MA, S.A. Editorial y Publicaciones, Madrid, España.

MARCAS COMERCIALES. Las designaciones utilizadas por las empresas para distinguir sus productos (hardware, software, sistemas operativos, etc.) suelen ser marcas registradas. RA-MA ha intentado a lo largo de este libro distinguir las marcas comerciales de los términos descriptivos, siguiendo el estilo que utiliza el fabricante, sin intención de infringir la marca y solo en beneficio del propietario de la misma. Los datos de los ejemplos y pantallas son ficticios a no ser que se especifique lo contrario.

RA-MA es una marca comercial registrada.

Se ha puesto el máximo empeño en ofrecer al lector una información completa y precisa. Sin embargo, RA-MA Editorial no asume ninguna responsabilidad derivada de su uso ni tampoco de cualquier violación de patentes ni otros derechos de terceras partes que pudieran ocurrir. Esta publicación tiene por objeto proporcionar unos conocimientos precisos y acreditados sobre el tema tratado. Su venta no supone para el editor ninguna forma de asistencia legal, administrativa o de ningún otro tipo. En caso de precisarse asesoría legal u otra forma de ayuda experta, deben buscarse los servicios de un profesional competente.

Reservados todos los derechos de publicación en cualquier idioma.

Según lo dispuesto en el Código Penal vigente ninguna parte de este libro puede ser reproducida, grabada en sistema de almacenamiento o transmitida en forma alguna ni por cualquier procedimiento, ya sea electrónico, mecánico, reprográfico, magnético o cualquier otro sin autorización previa y por escrito de RA-MA; su contenido está protegido por la Ley vigente que establece penas de prisión y/o multas a quienes, intencionadamente, reprodujeren o plagiaren, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica.

Editado por:
RA-MA, S.A. Editorial y Publicaciones
Calle Jarama, 33, Polígono Industrial IGARSA
28860 PARACUELLOS DE JARAMA, Madrid
Teléfono: 91 658 42 80
Fax: 91 662 81 39
Correo electrónico: editorial@ra-ma.com
Internet: www.ra-ma.es y www.ra-ma.com

Maquetación: Gustavo San Román Borrueco
Diseño Portada: Antonio García Tomé

ISBN: 978-84-9964-348-9

E-Book desarrollado en España en Septiembre de 2014

Electrónica

MARCOS GARCÍA LORENZO
PABLO HUERTA PELLITERO
CARLOS SÁNCHEZ DE LA LAMA
PABLO TOHARIA RABASCO

Ra-Ma®

Descarga de Material Adicional

Este E-book tiene disponible un material adicional que complementa el contenido del mismo.

Este material se encuentra disponible en nuestra página Web www.ra-ma.com.

Para descargarlo debe dirigirse a la ficha del libro de papel que se corresponde con el libro electrónico que Ud. ha adquirido. Para localizar la ficha del libro de papel puede utilizar el buscador de la Web.

Una vez en la ficha del libro encontrará un enlace con un texto similar a este:

“Descarga del material adicional del libro”

Pulsando sobre este enlace, el fichero comenzará a descargarse.

Una vez concluida la descarga dispondrá de un archivo comprimido. Debe utilizar un software descompresor adecuado para completar la operación. En el proceso de descompresión se le solicitará una contraseña, dicha contraseña coincide con los 13 dígitos del ISBN del libro de papel (incluidos los guiones).

Encontrará este dato en la misma ficha del libro donde descargó el material adicional.

Si tiene cualquier pregunta no dude en ponerse en contacto con nosotros en la siguiente dirección de correo: ebooks@ra-ma.com

A Mamen, gracias por estar siempre a mi lado.

Marcos García

A mi mujer Laura, por su apoyo y ánimo constante.

Pablo Huerta

A mi familia.

Carlos Sánchez

A Beatriz, mis padres y mis hermanos, por todo el apoyo que me dan siempre.

Pablo Toharia

Índice

INTRODUCCIÓN **7**

CAPÍTULO 1. SISTEMAS DIGITALES **9**
1.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DIGITALES 10
1.1.1 Magnitudes analógicas y magnitudes digitales 10
1.1.2 Ventajas e inconvenientes de los sistemas digitales 12
1.1.3 Señales digitales 12
1.2 EL ÁLGEBRA DE BOOLE Y LAS PUERTAS LÓGICAS: LAS PIEDRAS ANGULARES DEL DISEÑO DE CIRCUITOS DIGITALES 14
1.2.1 Propiedades y teoremas del álgebra del Boole 17
1.2.2 Puertas lógicas 19
1.2.3 Representación de funciones lógicas 24
1.2.4 Simplificación de funciones lógicas 30
1.3 TIPOS DE CIRCUITOS DIGITALES 31
1.4 CIRCUITOS COMBINACIONALES 32
1.4.1 Bloques básicos 32
1.4.2 Dispositivos lógicos programables (PLD) 41
1.5 CASO PRÁCTICO 42
1.5.1 El Multímetro digital 42
1.5.2 Placas de inserción 43

RESUMEN DEL CAPÍTULO 45
EJERCICIOS PROPUESTOS 46
TEST DE CONOCIMIENTOS 47

CAPÍTULO 2. CIRCUITOS LÓGICOS SECUENCIALES **49**
2.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS SECUENCIALES 50
2.2 SINCRONISMO 51
2.3 BIESTABLES 52
2.3.1 Biestable S-R asíncrono 53
2.3.2 Biestable S-R síncrono por nivel 56
2.3.3 Biestable S-R síncrono por flanco 57
2.3.4 Biestable D 59
2.3.5 Biestable J-K 59
2.3.6 Biestable T 61
2.3.7 Señales asíncronas 62
2.4 BLOQUES SECUENCIALES ESTÁNDAR 63
2.4.1 Contadores 63
2.4.2 Divisores de frecuencia 68
2.4.3 Registros 68

2.5 CASO PRÁCTICO 73

RESUMEN DEL CAPÍTULO 75
EJERCICIOS PROPUESTOS 75
TEST DE CONOCIMIENTOS 76

CAPÍTULO 3. REPRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN 77
3.1 INTRODUCCIÓN A LA REPRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN 78
3.2 SISTEMAS DE REPRESENTACIÓN NUMÉRICA 78
3.2.1 Conversión entre bases 79
3.2.2 Introducción a los sistemas de representación numérica en base 2 82
3.2.3 Sistemas de representación numérica posicionales en coma fija 84
3.2.4 Codificaciones BCD 91
3.2.5 Códigos continuos 92
3.3 SISTEMAS DE REPRESENTACIÓN ALFANUMÉRICA 92

RESUMEN DEL CAPÍTULO 94
EJERCICIOS PROPUESTOS 94
TEST DE CONOCIMIENTOS 96

CAPÍTULO 4. COMPONENTES ELECTRÓNICOS BÁSICOS 97
4.1 COMPONENTES PASIVOS 98
4.1.1 Resistencias 98
4.1.2 Condensadores 104
4.1.3 Bobinas 112
4.2 COMPONENTES ACTIVOS 115
4.2.1 Semiconductores 115
4.2.2 Diodos 120
4.3 CASO PRÁCTICO 126

RESUMEN DEL CAPÍTULO 127
EJERCICIOS PROPUESTOS 128
TEST DE CONOCIMIENTOS 129

CAPÍTULO 5. TRANSISTORES BIPOLARES 131
5.1 ESTRUCTURA FÍSICA DEL TRANSISTOR 133
5.1.1 La unión bipolar. Terminales del transistor 133
5.1.2 Funcionamiento de los transistores NPN y PNP 134
5.1.3 Corrientes y tensiones en un transistor 136
5.1.4 Características típicas de los transistores 138
5.1.5 Tipos de transistores 140
5.2 POLARIZACIÓN Y MODOS DE OPERACIÓN 141
5.2.1 Curvas características 141
5.2.2 Resolución gráfica de problemas 143
5.2.3 Modelo equivalente en CC 147
5.2.4 Conmutación 151
5.3 AMPLIFICACIÓN CON TRANSISTORES 154
5.3.1 Modelo de pequeña señal del transistor 154
5.3.2 Configuraciones de etapa simple 157

5.4 CASO PRÁCTICO 161

RESUMEN DEL CAPÍTULO 162
EJERCICIOS PROPUESTOS 162
TEST DE CONOCIMIENTOS 165

CAPÍTULO 6. FUENTES DE ALIMENTACIÓN 167
6.1 TIPOS Y LIMITACIONES 168
6.2 FUENTES DE ALIMENTACIÓN LINEALES 171
6.2.1 Transformación 172
6.2.2 Rectificación 174
6.2.3 Filtrado 177
6.2.4 Regulación 182
6.3 FUENTES CONMUTADAS 187
6.3.1 Inversor. Topologías DC-DC. 188
6.3.2 Control del inversor 192
6.4 CASO PRÁCTICO 193

RESUMEN DEL CAPÍTULO 194
EJERCICIOS PROPUESTOS 194
TEST DE CONOCIMIENTOS 195

CAPÍTULO 7. COMPONENTES PARA ELECTRÓNICA DE POTENCIA 197
7.1 DIODO SHOCKLEY 198
7.2 EL TIRISTOR 200
7.2.1 Funcionamiento 200
7.2.2 Circuitos de disparo 202
7.2.3 Conmutación natural y forzada 202
7.2.4 Aplicación en rectificadores 203
7.3 DIACS Y TRIACS 206
7.3.1 El DIAC 206
7.3.2 El TRIAC 209
7.4 EL TRANSISTOR UJT 212

RESUMEN DEL CAPÍTULO 215
EJERCICIOS PROPUESTOS 215
TEST DE CONOCIMIENTOS 216

CAPÍTULO 8. AMPLIFICADORES OPERACIONALES 219
8.1 EL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL 221
8.2 CARACTERÍSTICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL 225
8.2.1 Impedancias de entrada y salida 225
8.2.2 Ganancia en lazo abierto 225
8.3 CIRCUITOS CON AMPLIFICADORES OPERACIONALES 226
8.3.1 Realimentación negativa 226
8.3.2 Configuración no inversora 227
8.3.3 Configuración inversora 229
8.3.4 Otras aplicaciones 235
8.4 FILTROS ACTIVOS 237

8.4.1 Paso bajo 238
8.4.2 Paso alto 241
8.4.3 Paso banda 243
8.5 CONVERTIDORES I-V Y V-I 246

RESUMEN DEL CAPÍTULO 248
EJERCICIOS PROPUESTOS 248
TEST DE CONOCIMIENTOS 249

CAPÍTULO 9. OSCILADORES Y TEMPORIZADORES 251
9.1 OSCILADORES 252
9.1.1 Osciladores RC 253
9.1.2 Osciladores LC y cristal 255
9.1.3 Oscilador de relajación 258
9.1.4 PLLs 261
9.2 TEMPORIZADORES INTEGRADOS: EL CI 555 263
9.2.1 Funcionamiento como temporizador 264
9.2.2 Funcionamiento como oscilador 266

RESUMEN DEL CAPÍTULO 268
EJERCICIOS PROPUESTOS 269
TEST DE CONOCIMIENTOS 270

CAPÍTULO 10. APÉNDICE 271
10.1 SEÑALES DIGITALES (AMPLIACIÓN) 272
10.1.1 Conjuntos universales 272
10.2 DISPOSITIVOS LÓGICOS PROGRAMABLES (AMPLIACIÓN) 273
10.2.1 Memorias ROM 273
10.2.2 Matrices lógicas programables (PLA) 274
10.3 TIPOS DE CODIFICACIONES (AMPLIACIÓN) 275
10.3.1 Códigos continuos (ampliación) 276
10.3.2 Sistemas de representación numérica en coma flotante 278
10.3.3 Otros sistemas de representación 280
10.4 PARÁMETROS DE RENDIMIENTO DE LOS RECTIFICADORES 281
10.5 ANÁLISIS ARMÓNICO. FILTROS A INDUCTOR 282

ÍNDICE ALFABÉTICO 287

Introducción

Este libro surge con el objetivo de acercar al lector a los aspectos más importantes que encierra la electrónica ante la creciente demanda de personal cualificado para su administración. Con tal propósito, puede servir de apoyo también para estudiantes del Ciclo Formativo de Grado Medio de Instalaciones Eléctricas y Automáticas y para profesionales de distinto rango.

Para todo aquel que use este libro en el entorno de la enseñanza (Ciclos Formativos, Profesionales o Universidad) se ofrecen varias posibilidades: utilizar los conocimientos aquí expuestos para inculcar aspectos genéricos de la electrónica o simplemente centrarse en preparar a fondo alguno de ellos. La extensión de los contenidos aquí incluidos hace imposible su desarrollo completo en la mayoría de los casos.

Ra-Ma pone a disposición de los profesores una guía didáctica para el desarrollo del tema que incluye las soluciones a los ejercicios expuestos en el texto. Puede solicitarlo a *editorial@ra-ma.com*, acreditándose como docente y siempre que el libro sea utilizado como texto base para impartir las clases.

1 Sistemas digitales

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- ✓ Entender las diferencias principales que existen entre los sistemas analógicos y digitales.
- ✓ Comprender los fundamentos del álgebra de Boole y su aplicación en el diseño y análisis de los sistemas digitales.
- ✓ Estudiar los fundamentos del diseño de circuitos combinacionales.
- ✓ Introducir al alumno en el diseño de circuitos utilizando bloques combinacionales básicos.

1.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DIGITALES

Podríamos definir un **computador** como una máquina capaz de procesar información. Dicho procesado implica manipular la información de partida con el objetivo de resolver un determinado problema. Sin embargo, en esta definición no se hace referencia a la tecnología con la que se fabrican dichos computadores.

A lo largo de la historia de la computación se han utilizado distintas tecnologías en su construcción: desde las primeras máquinas mecánicas de *Pascal*, *Babbage* y *Leibniz*, pasando por las máquinas compuestas de piezas electromecánicas como relés, entre los que destaca el *Harvard Mark I*, y por las máquinas electrónicas actuales hasta los novedosos sistemas ópticos o los aún experimentales sistemas cuánticos y de procesado basado en ADN. En este libro nos centraremos en los más extendidos actualmente: los sistemas electrónicos.

1.1.1 MAGNITUDES ANALÓGICAS Y MAGNITUDES DIGITALES

La información que se suministrará al sistema, independientemente de la tecnología utilizada, viene caracterizada por una o varias magnitudes. Una **magnitud** es una propiedad física que puede medirse cuantitativamente. Dependiendo de la naturaleza de las mismas podemos dividirlas en analógicas y digitales. Se denomina **señal** a la evolución en el tiempo de dichas magnitudes.

Las **magnitudes analógicas** son aquellas que toman valor en un rango continuo. Matemáticamente se asocian con números reales o conjuntos de los mismos. Se pueden poner muchos ejemplos de magnitudes analógicas: temperatura, voltaje, fuerza, etc. La mayoría de los fenómenos naturales se miden utilizando magnitudes analógicas.

Por el contrario las **magnitudes digitales** toman valor en un rango discreto. Al igual que las magnitudes analógicas podemos asociarlas con un subconjunto matemático: los números enteros. Como ejemplos de magnitudes digitales podemos destacar el número de habitantes de una población o el número de coches de un determinado aparcamiento.

Recapitulando, las magnitudes digitales toman valor en el rango de los números reales y las magnitudes digitales toman valor en el rango de los números enteros. De este modo, tiene sentido hablar de una intensidad de corriente de 1,25 Amperios y no tiene sentido decir que en una determinada librería hay 30,6 libros. Una determinada magnitud puede variar en el tiempo. Esta variación de la magnitud en el tiempo recibe el nombre de señal y al igual que las magnitudes pueden ser analógicas o digitales.

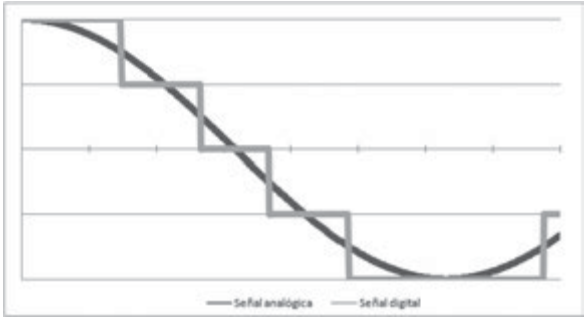


Figura 1.1. *Comparativa entre una señal analógica y una señal digital*

Es probable que el lector ya sepa que los sistemas electrónicos se dividen en sistemas analógicos y sistemas digitales. Los analógicos son aquellos que procesan información analógica, mientras que por el contrarío los sistemas digitales procesan información digital.

Atendiendo a esta definición y sabiendo que la mayoría de los fenómenos naturales se miden mediante magnitudes analógicas, se podría llegar a pensar que los sistemas digitales tienen un ámbito de aplicación más reducido que los sistemas analógicos. Esto no es cierto en absoluto, si bien es cierto que los sistemas digitales solo pueden manipular información digital, la información analógica puede transformarse en información digital mediante **conversores analógico/digitales** y la información digital puede transformarse en información analógica mediante **conversores digital/analógicos** (a partir de ahora D/A).

A los conversores analógico/digitales a partir de ahora se les denominará A/D.

A los conversores digital/analógicos a partir de ahora se les denominará D/A.

EJEMPLO 1.1

Se pretende diseñar un sistema que regule la temperatura de una habitación. El sistema recibe como entrada la temperatura de la habitación y como salida debe devolver el voltaje que hay que suministrar al ventilador encargado de enfriarla. Podríamos construir dicho sistema de control utilizando un computador digital. Para ello deberíamos utilizar un conversor A/D que transforme la señal de entrada para que pueda ser procesada por nuestro computador y un conversor D/A que transforme la salida de nuestro computador en la señal que necesita el ventilador.

ACTIVIDADES 1.1

- Buscar información sobre conversores A/D y D/A.
- Entender la diferencia entre conversores causales y no causales.

1.1.2 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS SISTEMAS DIGITALES

Actualmente la electrónica digital está experimentado un gran empuje y se está imponiendo en mercados en los que tradicionalmente se imponía la electrónica analógica. Esto se debe sus numerosas ventajas:

- **Sencillez**. El diseño de circuitos digitales es relativamente simple reduciendo el tiempo de diseño y abaratando el coste del producto. Existen numerosas herramientas tanto de alto nivel (lenguajes de descripción como el VHDL o el VERILOG) como de bajo nivel hardware (herramientas CAD como Virtuoso Layout Suite) que nos permiten definir de forma sencilla circuitos digitales.
- **Menor sensibilidad a ruidos**. Al trasmitir la señal por un determinado medio ésta puede atenuarse y degradarse. La señal digital en muchos casos puede amplificarse y regenerarse.
- **Tolerancia a fallos**. Existen numerosos sistemas de codificación digital capaces de detectar información corrupta y en algunos casos regenerarla (bits de paridad, códigos de *Hamming*…).
- **Facilidad de almacenamiento**. Existen numerosos sustratos capaces de almacenar de forma barata gran cantidad de información digital (memorias flash, discos duros magnéticos…). Además, se pueden encontrar algoritmos de compresión mucho más eficientes que los existentes para información analógica (codificación incremental, códigos de Huffman…).

ACTIVIDADES 1.2

- Buscar información sobre el problema del *aliasing* en las señales.

1.1.3 SEÑALES DIGITALES

Este capítulo se centra en describir los fundamentos del diseño de sistemas digitales. En la actualidad la información manejada por dichos sistemas es **binaria**, es decir, la información se compone por secuencias de dos dígitos: el “0” y el “1”. Se suele denominar al “1” como valor cierto y al “0” como valor falso. Esta información se codifica mediante una magnitud física: el voltaje. Cada tecnología define dos valores de voltaje: valor bajo (VL) y valor alto (VH). Generalmente se hace coincidir a VL con el valor “0” y VH con el valor “1”.

ACTIVIDADES 1.3

- Ampliar la información de este apartado con la que se adjunta en el apéndice del libro.

En el análisis y diseño de sistemas digitales, con el objetivo de facilitar la comprensión del sistema, se suele utiliza una señal idealizada en lugar del voltaje. El voltaje como señal analógica puede tener ruido y, como se ha comentado anteriormente, VL y VH no tienen valores precisos. Por este motivo, las señales del sistema se suelen mostrar como una onda cuadrada ideal que puede tomar los valores “0” y “1”.

En estas señales denominaremos **flanco** a una transición entre dos niveles. Si esta transición es de “0” a “1”, recibirá el nombre de flanco de subida, mientras que si es de “1” a “0” recibirá el nombre de flanco de bajada. La señal entre dos flancos recibirá el nombre de pulso. Si se encuentra entre un flanco de subida y uno de bajada se estará hablando de un **pulso** positivo, mientras que si se encuentra entre un flanco de bajada y uno de subida estaremos hablando de un pulso negativo.

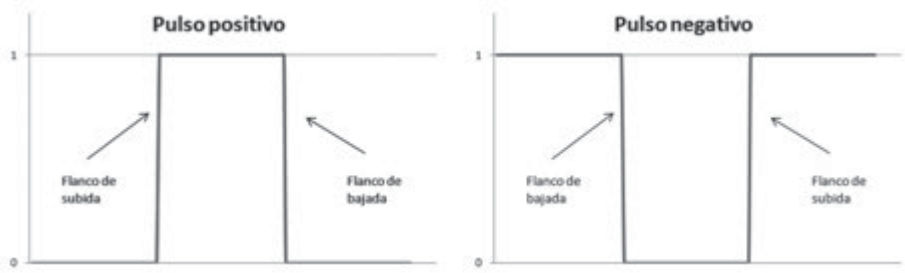


Figura 1.2. *Pulsos digitales*

Muchos sistemas digitales utilizan señales que se repiten de forma periódica para su sincronización. Dichas señales reciben el nombre de *reloj*. Es importante destacar que la duración del pulso positivo no tiene porque ser igual a la duración del pulso negativo, siempre y cuando todos los pulsos positivos y todos los pulsos negativos tengan la misma duración.

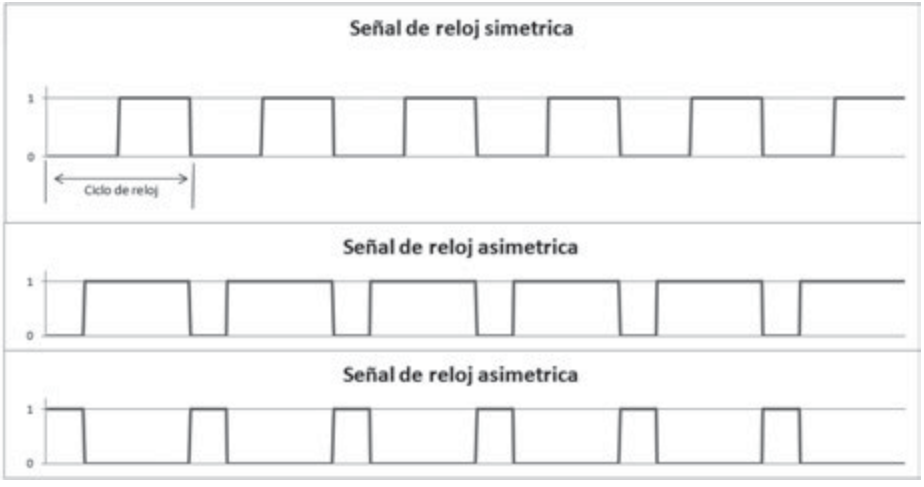


Figura 1.3. *Distintos tipos de señales de reloj*

El conjunto de señales de un sistema recibe el nombre de **cronograma**. Los cronogramas son herramientas imprescindibles en el diseño, el análisis y la depuración de circuitos digitales.

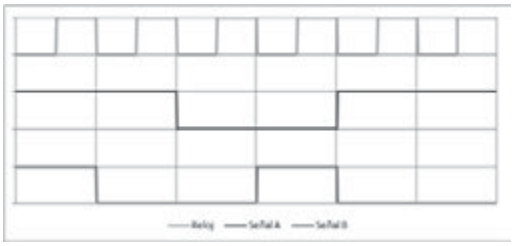


Figura 1.4. *Cronograma de un sistema con 2 señales (A y B)*

1.2 EL ÁLGEBRA DE BOOLE Y LAS PUERTAS LÓGICAS: LAS PIEDRAS ANGULARES DEL DISEÑO DE CIRCUITOS DIGITALES

En el capítulo 3 se describirán distintas codificaciones que nos permiten representar información de distinta naturaleza. El complemento a 2 permite representar números enteros y el sistema ANSI permite representar caracteres alfanuméricos. El objetivo de este libro no es que el lector sea capaz de operar con distintas codificaciones, sino que sea capaz de diseñar circuitos que realicen estas operaciones. Una de las herramientas básicas en la síntesis de circuitos digitales es el **álgebra de Boole** .El álgebra de *Boole* fue descrita por el matemático británico George Boole en libro *An Investigation of the Laws of Thought* en 1854. Lo que no sabía George Boole es que casi un siglo después, en 1939, Claude E. Shannon propondría el uso de su formalismo matemático para el análisis de circuitos digitales en su tesis de máster *A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits*, convirtiéndolo en la piedra angular del diseño de estos sistemas. Esta herramienta simplifica su descripción, siendo la gran responsable del auge de esta tecnología, omnipresente en nuestros días y que actualmente se está permitiendo ocupar nichos hasta hace poco reservados a los sistemas analógicos como el control industrial.

¿SABÍAS QUE...?

Toda operación realizada en un sistema digital, ya sea un computador, un teléfono, un reloj o una calculadora utiliza las operaciones definidas por el algebra de Boole. Unas veces estas funciones vendrán implementadas en hardware y otras en software.

Se puede definir el álgebra de Boole bivaluada (desde este punto en adelante la denominaremos solo álgebra de Boole) a partir de sus operadores, siendo el conjunto B que cumple las siguientes propiedades:

- Todo elemento a del conjunto toma o bien el valor 0 o bien el valor 1:

  $\forall\, a \in B \mid a = 0$ ó $a = 1$

- Para todos los elementos del conjunto se define la operación unitaria (un único operando) **complemento** o negación (') de la siguiente forma:

  Si a es igual a 0, a' es igual a 1: $a' = 1 \rightarrow a = 0$
  Si a es igual a 1, a' es igual a 0: $a' = 0 \rightarrow a = 1$

- Para todos los elementos del conjunto se define la operación binaria (dos operandos) **producto lógico** (*) como:

  Si a es igual a 0 y b es igual a 0, $a*b$ es igual a 0: $a*b = 0 \rightarrow a = 0$ y $b = 0$.
  Si a es igual a 0 y b es igual a 1, $a*b$ es igual a 0: $a*b = 0 \rightarrow a = 0$ y $b = 1$.
  Si a es igual a 1 y b es igual a *0*, $a*b$ es igual a 0: $a*b = 0 \rightarrow a = 1$ y $b = 0$.
  Si a es igual a 1 y b es igual a 1, $a*b$ es igual a 1: $a*b = 1 \rightarrow a = 1$ y $b = 1$.

- Para todos los elementos del conjunto se define la operación binaria (dos operandos) **suma lógica** (+) como:

  Si a es igual a 0 y b es igual a 0, $a*b$ es igual a 0: $a*b = 0 \rightarrow a = 0$ y $b = 0$.
  Si a es igual a 0 y b es igual a 1, $a*b$ es igual a 1: $a*b = 1 \rightarrow a = 0$ y $b = 1$.
  Si a es igual a 1 y b es igual a 0, $a*b$ es igual a 1: $a*b = 1 \rightarrow a = 1$ y $b = 0$.
  Si a es igual a 1 y b es igual a 1, $a*b$ es igual a 1: $a*b = 1 \rightarrow a = 1$ y $b = 1$.

Estos operadores (+, *, ‘) combinan variables y constantes formando *expresiones lógicas*.

EJEMPLO 1.2

Podríamos definir la función F que depende de las variables a, b y c como $F(a, b, c) = a*b' + c + 0$. De esta forma F queda definida para cualquier combinación de valores de a, b y c. Si a es igual a 1, b es igual a 0 y c es igual a 0, F tomará el valor de *1*:

$F(1, 0, 0) = 1 * 0' + 0 + 0 = 1 * 1 + 0 + 0 = 1 + 0 + 0 = 1 + 0 = 0$

Es importante que los operadores se apliquen en el orden correcto. Si no es así, la expresión podría tomar un valor erróneo. Para poder entender cualquier función lógica es necesario conocer cuál es la prioridad de los operadores. Se dice que un operador x tiene prioridad sobre otro operador y cuando ante la posibilidad de aplicar los dos operadores, el operador x se aplicará siempre primero. Decimos que el operador complemento (‘) tiene prioridad sobre el operador producto lógico (*), puesto que debe aplicarse primero.

EJEMPLO 1.3

Si se define $F(a,b)=a*b'$ diremos que F es igual al producto de a por el complemento de b y **NO** que F es el complemento del producto de a y b. De esta forma:

$F(0, 1) = 0 * 1' = 0 * 0 = 0$

y **NO**: $F(0, 1) = 0 * 1' = 0' = 1$

Las prioridades de los operadores están preestablecidas de forma arbitraria por convenio, siendo el operador de mayor prioridad la negación o complemento y el de menor prioridad la suma lógica. El complemento se aplicará antes que el producto y que la suma; y el producto se aplicará antes que la suma. Para poder modificar la prioridad de un operador se pueden utilizar paréntesis, priorizando de esta manera la expresión comprendida entre dos paréntesis, al igual que se hace en cualquier expresión algebraica.

EJEMPLO 1.4

Si se desea que la función aritmética *F* represente el complemento del producto de dos variables *a* y *b*, podríamos utilizar la siguiente expresión lógica $F(a, b) = (a * b)'$. De esta forma:

$F(0, 1) = (0 * 1)' = (0)' = 1$

¿SABÍAS QUE...?

En inglés:

- Puerta lógica: *logic gate*.
- Salida y entrada digital: *digital output and input.*
- Símbolo: *symbol.*
- Sonda lógica: *logic probe.*
- Tabla de verdad: *truth table.*
- Circuito integrado (C.I.): *integrated circuit* (I.C.).
- Placa de inserción: *protoboard*.
- Hoja de características: *datasheet*.

Antes de finalizar este apartado en el que se han introducido los conceptos de álgebra de *Boole* y expresiones lógicas, se quiere destacar que los operadores producto lógico, suma lógica y conjunción pueden representarse de forma distinta a la que se ha indicado aquí. Es también común en la bibliografía que al operador producto lógico se le denomine *conjunción* o *and lógico* y se le represente como $\wedge$ o *AND,* de la misma forma al operador suma lógica se le puede denominar *disyunción* o *or lógico* y se le representa como $\vee$ o *OR* y por último al operador conjunción se le puede llamar *negación* o *not lógico* y se puede representar con un subrayado alto ¯, con ~, ¬ o con un NOT. Los elementos del conjunto *B* también pueden recibir otros nombres: en algunas ocasiones el valor *1* puede sustituirse por *True*, *Verdadero*, *V* o *T* y el valor *0* por *False*, *Falso o F*. De esta forma, las siguientes expresiones lógicas representan la misma función:

$$F(a, b, c) = (a * b)' + c$$

$$F(a, b, c) = \neg (a \wedge b) \vee c$$

$$F(a, b, c) = \overline{(a \wedge b)} \vee c$$

$$F(a, b, c) = NOT\ (a\ AND\ b)\ OR\ c$$

1.2.1 PROPIEDADES Y TEOREMAS DEL ÁLGEBRA DEL BOOLE

El álgebra de Boole verifica ciertos teoremas, propiedades y principios que nos permitirán operar con las expresiones lógicas dándonos la posibilidad de modificarlas con distintos propósitos, por ejemplo simplificar una expresión. De esta forma, el lector debe tener claro que una función lógica puede representarse con distintas expresiones.

Uno de los principios más importantes del álgebra de *Boole*, es el **principio de dualidad**. Este principio nos permite inferir nuevos teoremas a partir de teoremas ya existentes. El nuevo teorema recibirá el nombre de **teorema dual**. El principio de dualidad indica que *dado un teorema, existe un teorema dual que se obtiene sustituyendo los 0 por 1, los 1 por 0, los productos lógicos por sumas lógicas y las sumas lógicas por productos lógicos*.

EJEMPLO 1.5

Una vez comprobada la propiedad asociativa de la suma lógica quedará demostrada la propiedad asociativa del producto lógico:

$(a * b) * c = a * (b * c) \rightarrow (a + b) + c = a + (b + c)$

A continuación se detallarán las principales propiedades del álgebra de Boole:

- **Propiedad conmutativa** de la suma lógica:

  $a + b = b + a \qquad (\forall\, a, b \in B)$

- **Propiedad asociativa** de la suma lógica:

  $(a + b) + c = a + (b + c) \qquad (\forall\, a, b, c \in B)$

- **piedad distributiva** de la suma lógica:

  $a + (b * c) = (a + b) * (a + c) \qquad (\forall\, a, b, c \in B)$

- **Elemento neutro** de la suma lógica:

  $a + 0 = a \qquad (\forall\, a \in B)$

Utilizando el principio de dualidad se pueden enunciar las mismas propiedades del producto lógico:

- **Propiedad conmutativa** del producto lógico:

  $a * b = b * a \qquad (\forall\, a, b \in B)$

- **Propiedad asociativa** del producto lógico:

  $(a * b) * c = a * (b * c) \qquad (\forall\, a, b, c \in B)$

- **Propiedad distributiva** del producto lógico:

  $a * (b + c) = (a * b) + (a * c) \qquad (\forall\, a, b, c \in B)$

- **Elemento neutro** del producto lógico:

  $a * 1 = a \qquad (\forall\, a \in B)$

Además de las propiedades anteriores, todos los elementos de B deben cumplir la propiedad de ortocomplementariedad o **involución**:

$(a')' = a \qquad (\forall\, a \in B)$

También son de vital importancia los siguientes teoremas (a partir de ahora enunciaremos el teorema junto con su teorema dual):

- **Teorema de identidad**:

  $a + a' = 1 \qquad (\forall\, a \in B)$

  $a * a' = 0 \qquad (\forall\, a \in B)$

- **Teorema de idempotencia**:

  $a + a = a \qquad (\forall\, a \in B)$

  $a * a = a \qquad (\forall\, a \in B)$

- **Teorema de la identidad del 1 y del 0**:

  $a + 1 = 1 \qquad (\forall\, a \in B)$

  $a * 0 = 0 \qquad (\forall\, a \in B)$

- **Elemento neutro**:

  $a + 0 = a \qquad (\forall\, a \in B)$

  $a * 1 = a \qquad (\forall\, a \in B)$

- **Teoremas de absorción**:

  $a + a * b = a \qquad (\forall\, a, b \in B)$

  $a + a' * b = a + b \qquad (\forall\, a, b \in B)$

  $a * (a + b) = a \qquad (\forall\, a, b \in B)$

  $a * (a' + b) = a * b \qquad (\forall\, a, b \in B)$

Por último, se destacarán las **leyes de De Morgan**:

$(a + b)' = a' * b'$

$(a * b)' = a' + b'$

La importancia de las *Leyes de De Morgan* radica en su capacidad para sustituir los productos lógicos de una expresión por sumas lógicas y viceversa.

Antes de concluir con este apartado, destacar que las variables que aparecen en las propiedades, teoremas y leyes descritos anteriormente pueden ser sustituidos por expresiones lógicas.

EJEMPLO 1.6

Si se tiene la función lógica $F(x, y, z) = x * y + ((z + y) * (z + x))$, se puede sustituir $a = x * y$, $b = z + y$ y $c = z + x$ de forma que $F = a + (b * c)$ y aplicar la propiedad distributiva $F = (a + b) * (a + c)$ y por último deshacer el cambio, de forma que $F(x, y, z) =(x * y + z + y) * (x * y + z + x)$

Como el lector imaginará no hace falta realizar las sustituciones de variables de forma explícita. La mayor parte de las veces se podrán hacer estos cálculos mentalmente. De esta forma, se podría simplificar la expresión anterior de la siguiente manera:

- Teorema de absorción: $F(x, y, z) = (z + y) * (z + x)$
- Propiedad distributiva: $F(x, y, z) = z + x * y$

1.2.2 PUERTAS LÓGICAS

Llegados a este punto, ¿dónde radica la potencia del álgebra de *Boole* en el diseño de circuitos digitales? Antes de contestar a esa pregunta, se debe echar un vistazo a la unidad básica de cualquier circuito digital: el **transistor**. Este dispositivo se explicará de forma más detallada en los capítulos siguientes. Lo único que por ahora el lector necesita saber es que a partir de transistores se pueden construir los tres operadores básicos del álgebra de *Boole*: el producto, la suma y la negación.

Pueden encontrase implementaciones de dichos operadores en distintas tecnologías como las unipolares (o de efecto campo: *CMOS*, *NMOS* o *PMOS*) o las bipolares (*RTL* o *TTL*). La tecnología seleccionada para implementar nuestro circuito es básica a la hora de determinar los parámetros físicos de funcionamiento del sistema. Dependiendo de dicha tecnología nuestro circuito interpretará como 0 o como 1 a distintos valores de tensión, variara el retardo del cada dispositivo, el consumo de potencia… El fabricante del dispositivo nos detallara toda esta información en la hoja de características del producto o **datasheet**.

En la ficha del libro de *www.ra-ma.es* se podrán consultar las hojas de características de componentes electrónicos y los recursos de la unidad.

¿SABÍAS QUE…?

Los circuitos de tecnología TTL se prefijan normalmente con el número 74. En ocasiones, los verás con el número 54, es la versión de la serie militar e industrial (aeroespacial). Esto implica que sus especificaciones son superiores.

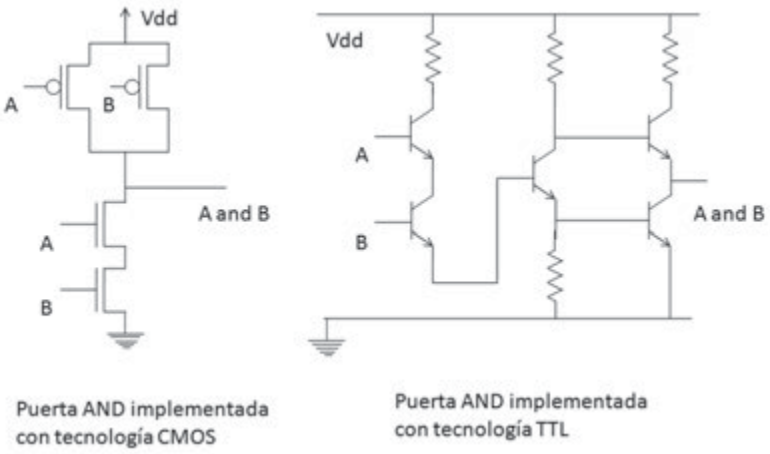
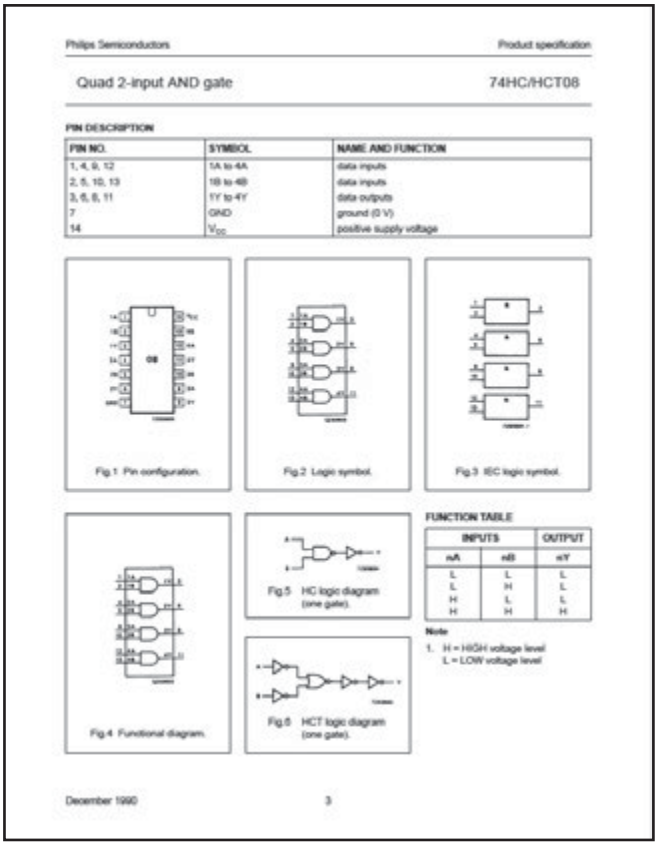


Figura 1.5. *Puerta AND de dos entradas implementada con transistores de efecto de campo (izquierda) y con transistores bipolares (derecha)*



Philips Semiconductors — Product specification

Quad 2-input AND gate — 74HC/HCT08

PIN DESCRIPTION

PIN NO.	SYMBOL	NAME AND FUNCTION
1, 4, 9, 12	1A to 4A	data inputs
2, 5, 10, 13	1B to 4B	data inputs
3, 6, 8, 11	1Y to 4Y	data outputs
7	GND	ground (0 V)
14	V_{CC}	positive supply voltage

Fig.1 Pin configuration.

Fig.2 Logic symbol.

Fig.3 IEC logic symbol.

Fig.4 Functional diagram.

Fig.5 HC logic diagram (one gate).

Fig.6 HCT logic diagram (one gate).

FUNCTION TABLE

INPUTS		OUTPUT
nA	nB	nY
L	L	L
L	H	L
H	L	L
H	H	H

Note

1. H = HIGH voltage level
   L = LOW voltage level

December 1990 — 3

Figura 1.6. *Fragmento del Datasheet de una puerta AND de dos entradas (74HC08) de Philips Semiconductors*

Mediante transistores (diodos y resistencias, dependiendo de la tecnología) no solo se pueden implementar los operadores básicos del álgebra de Boole sino también cualquier expresión lógica. En este libro no se detallará como diseñar funciones lógicas a nivel de transistor, en su lugar se utilizarán como bloques básicos implementaciones ya existentes de los operadores antes mencionados y de funciones lógicas sencillas, denominadas **puertas lógicas**.

Las puertas lógicas se caracterizan por la función lógica que realizan y por el número de entradas. De este modo se pueden encontrar puertas lógicas que realicen las tres operaciones básicas del álgebra de Boole: el producto realizado por las puertas AND, la suma realizada por las puertas OR y el complemento realizado por la el INVESOR. Se encuentran distintas puertas AND y OR dependiendo del número de entradas. Las puertas AND de dos entradas realizarán la función lógica $AND\,(a, b) = a * b$ y la puerta OR de 3 entradas realizará la función lógica $OR(a, b, c) = a + b + c$.

Además de las puertas lógicas que implementan los operadores del álgebra de *Boole* podemos encontrar otras que realizan las siguientes funciones lógicas sencillas:

- **Puerta O Negado o puerta NOR**. Como su nombre indica, implementa la función complemento de una suma lógica:

  $NOR(a, \ldots, n) = (a + \ldots + n)'$

- **Puerta Y Negado o NAND**. Como su nombre indica, implementa la función complemento de un producto lógico:

  $NAND(a, \ldots, n) = (a * \ldots * n)'$

- **Puerta O Exclusivo o XOR**. Esta puerta implementa la función lógica que toma el valor 1 si y solo una única variable de entrada toma el valor 1.

  $XOR(a, b, \ldots, n) = a * b' * \ldots * n' + a' * b * \ldots * n' + a' * b' * \ldots * n.$

- **Puerta O Exclusivo Negado o NXOR**. Esta puerta implementa la negación de la función XOR.

  $XOR(a, b, \ldots, n) = (a * b' * \ldots * n' + a' * b * \ldots * n' + a' * b' * \ldots * n)'.$

¡ EJEMPLO 1.7

Puerta NOR de tres entradas

- $NOR(a, b, c) = (a + b + c)'$

Puerta NAND de dos entradas

- $NAND(a, b) = (a * b)'$

Puerta XOR de tres entradas

- $XOR(a, b, c) = a * b' * c' + a' * b * c' + a' * b' * c$

Esta función puede encontrases como operador en funciones lógicas representada con el símbolo ⊕, de esta forma:

- $XOR(a, b, c) = a \oplus b \oplus c$

Puerta NXOR de dos entradas

- $NXOR(a, b) = (a * b' + a' * b)'$
- $NXOR(a, b) = (a \oplus b)'$

ACTIVIDADES 1.4

- Buscar información sobre las familias lógicas derivadas de la serie 7400.
- Profundizar en las familias lógicas TTL y CMOS más importantes: 74LS, 74HC y 74HTC más importantes.
- Buscar la hojas de características los siguientes componentes: un bloque de 6 inversores, 4 puertas NAND de 2 entradas, 4 puertas OR de dos entradas y 3 puertas NOR de tres entradas.
- ¿Qué es y para qué se utiliza una placa de inserción?

Como el lector habrá podido adivinar, se puede sintetizar cualquier expresión lógica de forma directa utilizando puertas lógicas. En el apartado anterior, se ha podido ver que una función lógica puede representarse con distintas expresiones. Por otro lado, una expresión lógica puede implementarse con distintas puertas lógicas. Las implementaciones de una función lógica se pueden representar mediante diagramas de flujo. En estos diagramas de flujo, las líneas representan señales: o bien variables de entrada, o bien señales que conectan puertas lógicas (valores intermedios), o bien la salida del circuito. Cada puerta lógica se representa con un símbolo. En la siguiente figura se muestran los símbolos que representan cada puerta lógica:

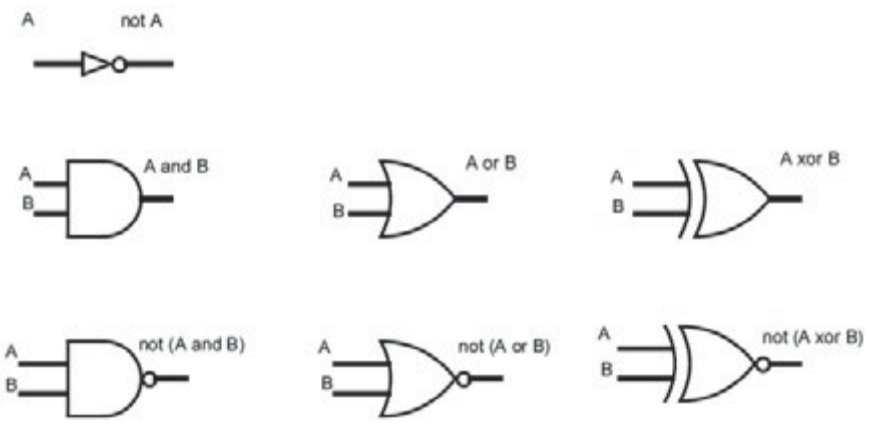


Figura 1.7. *Representación simbólica de puertas lógicas de dos entradas*

EJEMPLO 1.8

Las siguientes figuras muestran distintas implementaciones que pueden realizarse con la función lógica $F(a,b,c,d) = (a * b)' + c + d$.

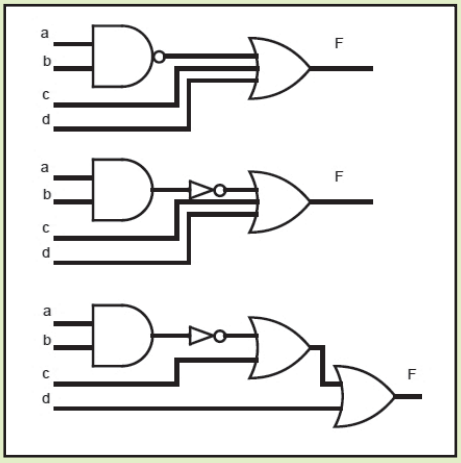


Figura 1.8. *Distintas representaciones de la función F*

En ocasiones no se dispone de todas las puertas lógicas necesarias para implementar un determinado circuito. Por ejemplo, si se desea implementar una función $F(a, b, c) = a + b + c$ bastaría con utilizar una puerta OR de tres entradas. Si no se dispone de dicha puerta podrían utilizarse dos puertas OR de dos entradas. Una puerta AND de 4 entradas puede sustituirse por cuatro puertas AND de dos entradas. Estas sustituciones son posibles gracias a las propiedades conmutativa y asociativa de la suma y producto lógicos.

EJEMPLO 1.9

$M(a, b, c, d) = (a * b) * (c * d) = a * (b * (c * d))$

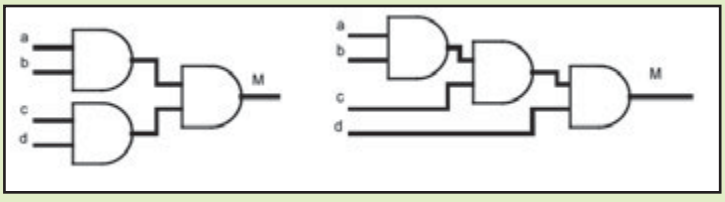


Figura 1.9*. Distintas representaciones de la función M*

Pueden darse situaciones en las que no se disponga de uno o varios tipos de puertas, por ejemplo, no se dispone de puertas AND ni de puertas NAND. En tal caso, se deberá manipular la expresión lógica para que solo aparezcan operadores que podamos implementar con las puertas disponibles.

EJEMPLO 1.10

Para resolver la situación anterior, se pueden utilizar las leyes de De Morgan, vistas anteriormente. De esta manera, la función M podría rescribirse de forma que solo requiera una puerta NOR de 4 entradas y 4 inversores: $M(a, b, c, d) = (a' + b' + c' + d')'$. Las leyes de De Morgan nos permiten eliminar los operadores producto o suma lógica de una expresión lógica.

1.2.3 REPRESENTACIÓN DE FUNCIONES LÓGICAS

Las funciones lógicas pueden representarse mediante expresiones lógicas que no son más que constantes y variables relacionadas a través de los operadores lógicos. Una función determinada puede describirse con múltiples expresiones lógicas. Ya se ha descrito en apartados anteriores que las expresiones lógicas pueden implementarse de forma directa mediante puertas lógicas. Esto provoca que una misma función lógica pueda implementarse mediante distintos circuitos. Las propiedades y teoremas del álgebra de Boole nos permiten operar con estas expresiones de forma que se ajusten a nuestras necesidades (minimizar el número de puertas lógicas, utilizar solo puertas lógicas de un tipo, eliminar rebotes o *gliches*…).

ACTIVIDADES 1.5

- Buscar la definición de rebote o *glich*.
- Indicar las implicaciones de los rebotes en la construcción de circuitos digitales.
- Proponer técnicas que permitan solucionarlos.

La existencia de múltiples representaciones no es el único problema cuando se usan expresiones lógicas para representar funciones. Si la función que se desea implementar es compleja, no siempre es fácil obtener una expresión que recoja el comportamiento deseado. Generalmente, es más sencillo describir una función lógica o, lo que es lo mismo, el comportamiento de un sistema utilizando una **tabla de verdad**. Las tablas de verdad indican el valor que debe tomar la salida o salidas del sistema para cada una de las combinaciones de las entradas. Esta representación es única para una determinada función lógica. A continuación se muestra la tabla de verdad de una función lógica $F(a, b, c) = a + b' * c = (a + b') * (a + c)$.

Tabla 1.1. Comparación de la tabla de verdad de dos expresiones lógicas de la misma función. Los valores intermedios se han incluido para facilitar la comprensión de las expresiones lógicas, el lector debe recordar que estos valores no forman parte de la tabla de verdad

Entradas			Valores intermedios		Salida	Valores intermedios		Salida
a	*b*	*c*	*b'*	*b'*c*	*a + b' * c*	(*a+b'*)	(*a +c*)	(*a+b'*) * (*a+c*)
0	0	0	1	0	0	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	1	0
1	0	0	1	0	1	1	1	1
1	0	1	1	0	1	1	1	1
1	1	0	0	0	1	1	1	1
1	1	1	0	1	1	1	1	1

Las tablas de verdad pueden utilizarse también para describir funciones lógicas de las cuales se desconoce su expresión *boolena*. De esta forma, se podría definir un sistema que tomara el valor 1 cuando hubiese un número par de unos en los cuatro bits de entrada mediante una tabla de verdad:

Tabla 1.2. La tabla de verdad contiene los valores de la salida para cada una de las combinaciones de la entrada

Entradas				Salida	Entradas				Salida
A1	A2	A3	A4	F	A1	A2	A3	A4	F
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
0	0	1	0	0	1	0	1	0	1
0	0	1	1	1	1	0	1	1	0
0	1	0	0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
0	1	1	0	1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1	1	1	1	1

En aparados anteriores, se ha explicado como sintetizar circuitos digitales a partir de expresiones *booleanas*. Por el contrario, las tablas de verdad permiten definir el comportamiento del sistema a partir de descripciones en lenguaje natural. A continuación, se detallarán procesos para pasar de una tabla de verdad a una expresión *booleana*. De esta forma, las fases de diseño de un sistema digital son las siguientes: definir la función lógica a partir de una tabla de verdad, obtener una de las expresiones equivalentes, implementar dicha expresión mediante puertas lógicas.

A partir de una tabla de verdad pueden definirse de forma directa dos expresiones *booleanas* equivalentes: la **primera forma normal**, también conocida por primera forma canónica o forma normal disyuntiva, y la **segunda forma normal**, también conocida como segunda forma canónica o forma normal conjuntiva.

Antes de ahondar en estas dos expresiones algebraicas se definirán conceptos básicos necesarios para su comprensión:

- **Literal**: variable afirmada o negada. En la expresión $a' + b * c + c'$ los literales son a', b, c y c'.
- **Término en producto**: es un término de una expresión *booleana* compuesto por productos de literales o un único literal. La expresión *booleana* $a + b * c'$ está formada por los términos en producto: a y $b * c'$. La expresión $(a * b)' * c$ **NO** es un término en producto porque $(a * b)'$ no es un literal.
- **Minitérmino**: es un término en producto que contiene todas las variables de una determinada función. La expresión $a * b' * c + a * b' * c'$ de la función lógica $F(a, b, c)$ está forma por los minitérminos $a * b' * c$ y $a * b' * c'$; $a * c$ no es un minitérmino de dicha función porque no contiene todas las variables de la función.
- **Término en suma**: es un término de una expresión *booleana* compuesto por sumas de literales o un único literal. La expresión *booleana* $(a + b) * c'$ está formada por los términos en suma: $a + b$ y c'. La expresión $(a + b)' + c'$ **NO** es un término en suma por $(a + b)'$ no es un literal.
- **Maxitérmino**: es un término en suma que contiene todas las variables de una determinada función. La expresión $(a + b' + c) * (a + b' + c')$ de la función lógica $F(a, b, c)$ está forma por los maxitérminos $a + b' + c$ y $a * b' * c'$. El término $a + c$ no es un maxitérmino de dicha función porque no contiene todas las variables de la función.
- **Suma de productos**: es una expresión *booleana* compuesta por sumas de términos en producto ó de un único término en producto. De esta forma, las expresiones $a + b * c'$, $a + b$, $a * b$, $a * b * c'$, a', $a * b' + a' * b$… pueden considerarse sumas de productos. Por el contrario, las siguientes expresiones $(a * b)' + c$, $(a + b)'$, $(a + b) * c$ no pueden ser consideradas sumas de productos.
- **Producto de sumas**: es una expresión *booleana* compuesta por productos de términos en suma o de un único término en suma. De esta forma, las expresiones $a *(b + c')$, $a + b$, $a * b$, $a + b + c'$, a', $(a + b') * (a' + b)$… pueden considerarse sumas de productos. Por el contrario, las siguientes expresiones $(a + b)' * c$, $(a * b)'$, $(a * b) + c$… no pueden ser consideradas productos de sumas.

Conocidos los conceptos anteriores se puede definir la primera forma normal como *la expresión de una función booleana compuesta por una suma de minitérminos*. Una de las propiedades más importantes de esta expresión es que, al igual que la tabla de verdad, es única para una determinada función lógica. Más interesante que esta propiedad es que a partir de una tabla de verdad podemos extraer de forma más o menos automática la primera forma normal canónica de una función.

Como se ha indicado en su definición: la forma normal disyuntiva no es más que una suma de minitérminos. Los minitérminos de una función son un conjunto finito formado por todas las combinaciones de sus literales. Los minitérminos de cualquier función $F(a, b, c)$ de tres variables serán 8: $a' * b' * c'$, $a' * b' * c$, $a' * b * c'$, $a' * b * c$, $a * b' * c'$, $a * b' * c$, $a * b * c'$ y $a * b * c$. La característica fundamental de un minitérmino es que solo toma el valor 1 para una combinación de las variables que lo forman. De esta forma podemos asociar cada minitérmino con la fila de la tabla de verdad que le da el valor 1. A partir de ahora, denominaremos a los miniterminos con la letra m y un subíndice que nos indica para que valor de la entrada (suponiendo que ésta esté en binario puro) para el cual el término toma el valor 1. De este modo: $m_0 = a' * b' * c'$, $m_1 = a' * b' * c$… y $m_7 = a * b * c$.

Tabla 1.3. Los minitérminos se asocian a la entrada para la cual toman el valor 1

a	b	c	Minitérmino	Expresión
0	0	0	m_0	a′ * b′ * c′
0	0	1	m_1	a′ * b′ * c
0	1	0	m_2	a′ * b * c′
0	1	1	m_3	a′ * b * c
1	0	0	m_4	a * b′ * c′
1	0	1	m_5	a * b′ * c
1	1	0	m_5	a * b * c′
1	1	1	m_7	a * b * c

Esta expresión lógica recibe el nombre de primera forma normal. Recapitulando, a partir de una tabla de verdad podemos obtener la expresión lógica en primera forma normal sumando los minitérminos que se corresponden con las filas de valor 1 en la tabla de verdad. A partir de la tabla 1.2, se puede obtener la expresión de la primera forma normal sumando los minitérminos: $m(3, 5, 6, 9, 10,12, 15) = m_3 + m_5 + m_6 + m_9 + m_{10} + m_{12} + m_{15} = a'b'cd + a'bc'd + a'bcd' + ab'c'd + ab'cd' + abc'd' + abcd$.

Tabla 1.4. Para construir la función en primera forma normal se seleccionan los minitérminos asociados a un valor 1 en la tabla de verdad

Entradas				Salida	m_i	Entradas				Salida	m_i
A1	A2	A3	A4	F	m_i	A1	A2	A3	A4	F	m_i
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	8
0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	9
0	0	1	0	0	2	1	0	1	0	1	10
0	0	1	1	1	3	1	0	1	1	0	11
0	1	0	0	0	4	1	1	0	0	1	12
0	1	0	1	1	5	1	1	0	1	0	13
0	1	1	0	1	6	1	1	1	0	0	14
0	1	1	1	0	7	1	1	1	1	1	15

Análogamente, la segunda forma normal es la expresión *booleana* de una función formada por el producto de maxitérminos de dicha función y al igual que la primera forma normal es única para una función determinada. Esta expresión también puede obtenerse de forma sencilla a partir de la tabla de verdad.

Los maxitérminos al igual que los minitérminos podemos obtenerlos combinado los literales de una determinada función. Los maxitérminos de cualquier función $F(a, b, c)$ de tres variables serán ocho: $a + b + c$, $a + b + c'$, $a + b' + c$, $a + b' + c'$, $a' + b + c$, $a' + b + c'$, $a' + b' + c$ y $a' + b' + c'$. A diferencia del caso anterior, los maxitérminos solo toman el valor *0* para una de las combinaciones de la entrada. De forma semejante, se puede asignar cada maxitérmino a la única combinación de valores de la entrada que hacen la expresión *0*, siendo el maxitérmino M_i aquel que se evalúa como *0* si la entrada toma el valor *i* (*i* está expresado en binario puro).

Tabla 1.5. Los maxitérminos se asocian a la entrada para la cual toman el valor 0

a	b	c	Maxitérmino	Expresión
0	0	0	M_0	a + b + c
0	0	1	M_1	a + b + c′
0	1	0	M_2	a + b′ + c
0	1	1	M_3	a + b′ + c′
1	0	0	M_4	a′ + b + c
1	0	1	M_5	a′ + b + c′
1	1	0	M_5	a′ + b′ + c
1	1	1	M_7	a′ + b′ + c′

La segunda forma normal se obtiene con el producto de los maxitérminos que hacen *0* la función. Siguiendo con el ejemplo anterior, se puede obtener la expresión *booleana* de la función expresada en la tabla 1.2 mediante el producto de los siguiente maxiterminos: $M(0, 1, 2, 4, 7, 8, 11, 13, 14) = M_0 * M_1 * M_2 * M_4 * M_7 * M_8 * M_{11} * M_{13} * M_{14} = (a + b + c + d) * (a + b + c + d') * (a + b + c' + d) * (a + b' + c + d) * (a + b' + c' + d') * (a' + b + c + d) * (a' + b + c' + d') * (a' + b' + c + d')* (a' + b' + c' + d)$.

Tabla 1.6. Para construir la función en primera forma normal se seleccionan los minitérminos asociados a un valor 1 en la tabla de verdad

Entradas				Salida	m_i	Entradas				Salida	m_i
A1	A2	A3	A4	F	m_i	A1	A2	A3	A4	F	m_i
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	8
0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	9
0	0	1	0	0	2	1	0	1	0	1	10
0	0	1	1	1	3	1	0	1	1	0	11
0	1	0	0	0	4	1	1	0	0	1	12
0	1	0	1	1	5	1	1	0	1	0	13
0	1	1	0	1	6	1	1	1	0	0	14
0	1	1	1	0	7	1	1	1	1	1	15

A modo de recapitulación cabe destacar que la primera y la segunda forma normal pueden obtenerse directamente a partir de la tabla de verdad. La primera mediante la suma de los minitérminos asociados a las filas que toman el valor *1* y la segunda mediante el producto de los maxitérminos que toman el valor *0*. Resaltar también, que ambas expresiones son equivalentes. Y por lo tanto el circuito sinterizado a partir de una de ellas realizará la misma función que el sintetizado a partir de la otra.

EJEMPLO 1.11

De este modo, si tenemos la función lógica *F*(*a*,*b*,*c*) descrita por la siguiente tabla de verdad:

Tabla 1.7. Tabla de verdad de una función con 3 entradas

a	b	c	Salida
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

De forma que la primera forma normal viene dada por la expresión: F= $m(2, 4, 5, 6) = a' * b * c' + a * b' * c' + a * b' * c + a * b * c'$; y la segunda forma normal viene dada por la expresión F= $M(0, 1, 3, 7) = (a + b + c) * (a + b + c') * (a + b' + c') * (a' + b' + c')$; los circuitos que se sintetizan a partir de ambas expresiones serán equivalentes:

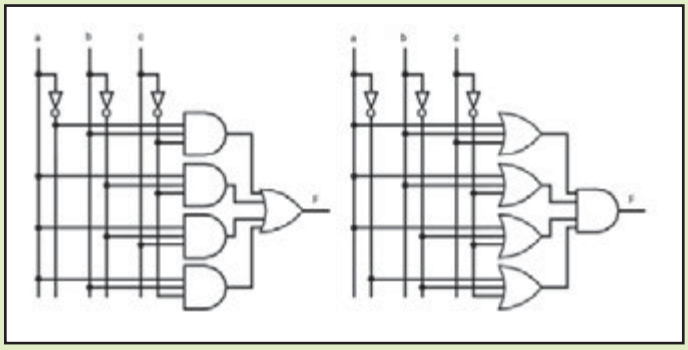


***Figura 1.10**. Los dos circuitos son equivalentes*

ACTIVIDADES 1.6

- Buscar en el apéndice información sobre los conjuntos universales de puertas lógicas. ¿Para qué sirven?

1.2.4 SIMPLIFICACIÓN DE FUNCIONES LÓGICAS

Como se ha comentado en apartados anteriores, una función lógica puede expresarse a través de distintas expresiones *booleanas*. El diseñador escogerá aquellas expresiones que se ajusten más a los requisitos del sistema. Por ejemplo, si se dispone únicamente de puertas OR e inversores, el diseñador deberá eliminar el operador lógico * de la expresión *booleana* a partir de la cual implementará el circuito.

Uno de los criterios más utilizados a la hora de diseñar la expresión *booleana* que representa la función a implementar es minimizar el número de operadores lógicos con los que se consigue minimizar el número de puertas lógicas, maximizando de este modo la integración del circuito y minimizado a su vez el coste económico y el consumo de potencia. Existen multitud de técnicas que permiten realizar este proceso. Una de las más referenciadas en la bibliografía son los mapas de **Karnaugh**. Se trata de un método visual que puede utilizarse cuando el número de variables de entrada es inferior a seis. En la práctica, no es operativo cuando el número de variables es mayor que cuatro.

Existen otras técnicas capaces de lidiar con las limitaciones de este método. En concreto destaca el método de **Quine-McCluskey**. Este algoritmo es fácil de implementar en un computador y garantiza que se obtiene la función *booleana* mínima.

ACTIVIDADES 1.7

- Buscar información sobre los métodos de *Quine-McCluskey* y las implicaciones por mapas de *Karnaugh*. ¿En qué casos se podrían necesitar?

En muchas ocasiones hay combinaciones de los valores de entrada que no pueden darse. Por ejemplo, si se codifican los dígitos del 0 al 9 con cuatro bits, hay combinaciones de bits que no tendrán asignado ningún valor. El diseñador deberá identificar estas situaciones. Estas combinaciones de las variables de entrada reciben el nombre de *don't care values*, puesto que podrán marcarse en la tabla de verdad del sistema como 1 o como 0, facilitándose la simplificación de la función *booleana*.

1.3 TIPOS DE CIRCUITOS DIGITALES

En apartados anteriores se ha descrito como utilizar el álgebra de *Boole* en el diseño e implementación de circuitos digitales. En el resto de apartados de este tema se estudiarán como aplicar estas técnicas a distintos sistemas digitales atendiendo a sus peculiaridades.

Los sistemas digitales pueden clasificarse en dos grupos: **sistemas combinacionales** y *sistemas secuenciales*. Los sistemas combinacionales son aquellos en los que *las salidas Z en un instante t dependen exclusivamente del valor de las entradas X en ese mismo instante.* Estos sistemas pueden caracterizarse con una función *booleana* por cada una de las salidas, $Z(t) = F\ (X(t))$. El comportamiento de estos sistemas puede describirse fácilmente por una tabla de verdad.

En los sistemas secuenciales, la *salida Z en un determinado instante de tiempo t depende de las entradas X y del estado S en ese mismo instante de tiempo t, el estado S en dicho instante dependerá del valor de las entradas X en todos los instantes anteriores*. Para permitir este comportamiento es necesario que el sistema almacene su estado. Podemos describir un sistema secuencial mediante dos funciones *booleanas*. La primera describe el valor de las salidas y depende del estado y en algunos sistemas, también de la entrada $Z(t) = G(S(t), X(t))$. La segunda describe el valor del estado en el instante siguiente y depende del estado actual y del valor de las entradas $S(t+1) = H(S(t), X(t))$.

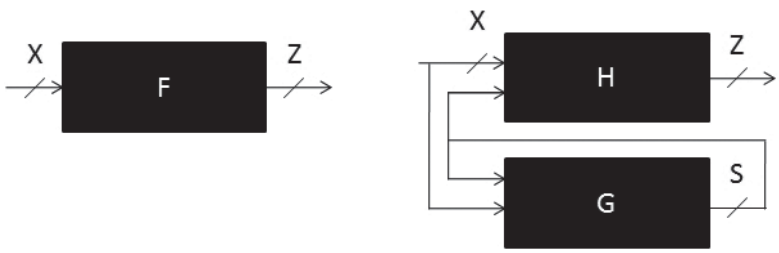


Figura 1.11. *La figura de la izquierda muestra el diagrama de bloques de un circuito combinacional y el de la derecha, el de un circuito secuencial*

Existen dos tipos de sistemas secuenciales: sistemas síncronos y asíncronos. Los circuitos secuenciales asíncronos son aquellos en los que los cambios en sistemas se producen en función de cambios en el estado o en las entradas. Por el contrario, los síncronos son sistemas secuenciales solo pueden cambiar de estado en determinados instantes de tiempo, estos instantes vienen marcados por una señal de reloj. El sistema solo hace caso de las entradas y de su estado interno en determinados instantes. Dependiendo de en qué momento se actualice el estado, podemos distinguir entre dos tipos de sistemas: activos por nivel y activos por flanco. Los sistemas activos por nivel actualizan su valor cuando el reloj está o bien a nivel alto, o bien esta a nivel bajo. Por el contrario, los sistemas activos por flanco cambian el valor de sus señales cuando se produce un flanco de bajada o cuando se produce un flanco de subida.

1.4 CIRCUITOS COMBINACIONALES

Como ya se ha enunciado anteriormente, los circuitos combinacionales son aquellos en los cuales las salidas solo dependen del valor de las entradas en dicho instante. Dichos circuitos se pueden definir utilizando una función lógica para cada una de sus entradas. Los pasos para diseñar un circuito combinacional son:

1. Definir la tabla de verdad de cada una de las salidas del sistema.
2. Crear una expresión *booleana* que defina el comportamiento de cada una de las salidas. En apartados anteriores se ha detallado como obtener la primera y la segunda forma normal a partir de una tabla de verdad.
3. Operar con la función lógica para que se ajuste a los requisitos del sistema. Utilizando los principios del álgebra de Boole o alguno de los métodos de simplificación de funciones existentes, la expresión lógica se puede transformar para ajustarse a los requisitos del sistema.
4. Implementar la función lógica obtenida mediante puertas lógicas. En apartados anteriores se describió como implementar funciones lógicas mediante puertas AND, OR y NOT y otros conjuntos de puertas lógicas universales. Recordar al lector que funciones lógicas en suma de productos y en producto de sumas pueden implementarse de forma directa mediante puertas NAND y NOR respectivamente.

La implementación de circuitos mediante puertas lógicas no es siempre la más adecuada. Cuando la complejidad del diseño es grande, se impone el uso de un diseño jerárquico y modular. Este diseño se basa en dividir el problema en bloques que realizan tareas complejas. Estos bloques, a su vez, pueden dividirse en bloques de menor complejidad hasta llegar a un nivel de puerta lógica. De esta forma, el diseño del sistema global se divide en el diseño de componentes cada vez más sencillos. Esta metodología recibe en nombre de metodología *top-down* (diseño de arriba a abajo).

A la hora de realizar el diseño de un circuito digital existen bloques combinacionales básicos que se pueden utilizar en la implementación del circuito. Además de los bloques convencionales básicos existen dispositivos formados por conjuntos de puertas lógicas y/o módulos básicos (combinacionales y/o secuenciales) cuyas conexiones pueden ser programadas, facilitando el desarrollo circuitos digitales. En los apartados siguientes se detallarán algunos de los bloques básicos más importantes así como algunos ejemplos de circuitos lógicos programables (PLD).

1.4.1 BLOQUES BÁSICOS

1.4.1.1 Multiplexores

Los **multiplexores** son circuitos combinacionales que permiten poner uno de los valores de la entrada en la salida. Dichos circuitos se caracterizan por tener 2^n entradas, 1 salida y n entradas de control. La salida tomará el valor de una de las 2^n entradas dependiendo del valor de las n señales de control. Adicionalmente, puede añadirse una entrada de control de activación o *enable*, de forma que si dicha entrada toma el valor 0 la salida tomará el valor 0 independientemente del valor de las entradas y de las señales de control. A continuación, se muestra la tabla de verdad, el diagrama de bloques de alto nivel y la implementación a nivel puerta lógica de un multiplexor 4 a 1 con señal de *enable* o activación.

Tabla 1.8. Tabla de verdad de un multiplexor 4 a 1

Entradas			Salida
Control 1	Control 0	*Enable*	MUX
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	0	0
1	1	0	0
0	0	1	Entrada 0
0	1	1	Entrada 1
1	0	1	Entrada 2
1	1	1	Entrada 3

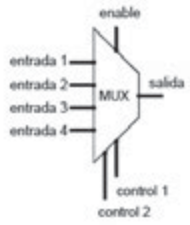


***Figura 1.12**. Diagrama de bloques de un multiplexor 4 a 1*

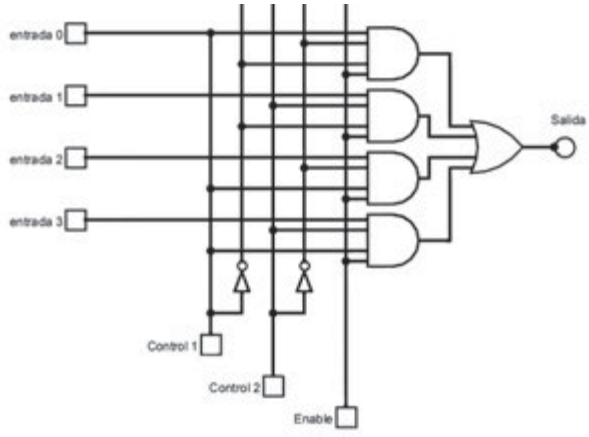


***Figura 1.13.** Implementación de un multiplexor 4 a 1*

EJEMPLO 1.12

Un ejemplo de la utilización de multiplexores (aunque no digitales como los que se ven aquí) se encuentra en las líneas telefónicas. Éstas usan exactamente el principio explicado. Transmiten varias llamadas telefónicas (señales de audio) a través de un único par cableado usando la técnica de multiplexado, de manera que cada señal de audio va únicamente al receptor al que está destinado.

Si no se dispone de un multiplexor con el número de entradas requerido, esté puede sintetizarse con multiplexores con un número de entradas menor. A continuación se muestra un ejemplo de cómo crear un multiplexor de 4 a 1 a partir de 3 multiplexores de 2 a 1. De forma análoga a partir de 5 multiplexores de 4 a uno puede crearse un multiplexor de 16 a 1.

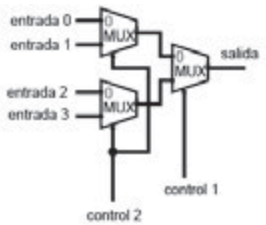


Figura 1.14. *Implementación de un multiplexor 4 a 1 a partir de multiplexores 2 a 1. Si los multiplexores 2 a 1 dispusiesen de señal de enable, se conectarían a la misma señal*

Los multiplexores pueden utilizarse para implementar circuitos digitales a partir de su tabla de verdad o de una función en primera forma normal. La salida de un multiplexor toma el valor de la entrada x_i cuando las señales de control codifican en binario el valor i. El valor i en binario puro se corresponde con la secuencia de unos y ceros que dan el valor *1* al minitérmino i. Si tomamos como señales de control las entradas del sistema, podemos asociar cada una de las entradas del multiplexor con un minitérmino. De esta forma, las entradas cuyo minitérmino tome el valor 1 en la función que se desea implementar, se colocarán a 1 y el resto de entradas a 0. La siguiente figura muestra la implementación de la función $F(a, b) = a'*b + a*b'$ utilizando un multiplexor 4 a 1.

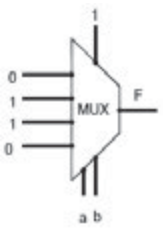


Figura 1.15*. Implementación de una función lógica utilizando un multiplexor 4 a 1 con señal de enable*

Desafortunadamente, en muchas ocasiones no se dispondrá de un multiplexor con tantas señales de control como entradas tenga el sistema. Pero aún en estos casos el podemos usar multiplexores en la implementación de nuestro circuito. Los multiplexores no son más que circuitos que realizan la suma de todos los minitérminos de las señales de

control, multiplicados por la entrada correspondiente. De esta forma, la función $F(a,b,c,d) = a * b + a * b' * (c + d') + a' * b' * d'$ puede implementarse con un multiplexor 4 a 1, donde a y b son las señales de control, rescribiendo la función como $f(a,b,c,d) = a * b * x_3 + a * b' * x_2 + a' * b * x_1 + a' * b' * x_0$, donde $x_0 = d'$, $x_1 = 0$, $x_2 = c + d'$ y $x_3 = 1$.

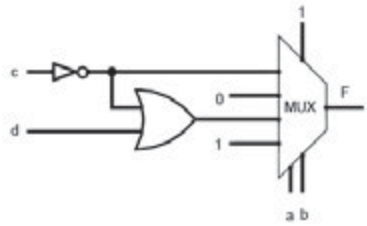


Figura 1.16. *Implementación de una función lógica de 4 variables de entrada utilizando un multiplexor 4 a 1 con señal de enable*

ACTIVIDADES 1.8

- Busca en Internet que es una ALU (Unidad Aritmético y Lógica).
- Diseña una ALU de un bit que sea capaz de hacer las operaciones AND, OR, NOT, dependiendo de unos valores de control que indiquen la operación a realizar (vea la nota lateral).

Para la realización de la actividad 15, tendrás que utilizar una puerta AND de dos entradas, una puerta OR de dos entradas y una puerta OR de una entrada. Además, para seleccionar la operación a realizar se deberá utilizar un multiplexor de tres a uno.

1.4.1.2 Demultiplexores

Los **demultiplexores** son circuitos combinacionales con 1 entrada, n señales de control y 2^n salidas. En estos circuitos todas las salidas tomarán el valor 0 excepto aquella seleccionada por el valor de la señales de control que tomará el valor de la entrada. Al igual en los multiplexores, puede añadirse una señal de activación o *enable* de forma que si esta toma el valor *0* todas las salidas toman el valor 0 y si toma el valor 1, el demultiplexor tiene el comportamiento descrito anteriormente. Puesto que este circuito tiene 2^n salidas, será necesario definir 2^n funciones lógicas para definir el comportamiento del circuito.

Tabla 1.9. Tabla de verdad de un demultiplexor 1 a 4

Entradas			Salidas			
Control 1	Control 0	*Enable*	Salida 0	Salida 0	Salida 0	Salida 0
0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0
0	0	1	Entrada	0	0	0
0	1	1	0	Entrada	0	0
1	0	1	0	0	Entrada	0
1	1	1	0	0	0	Entrada

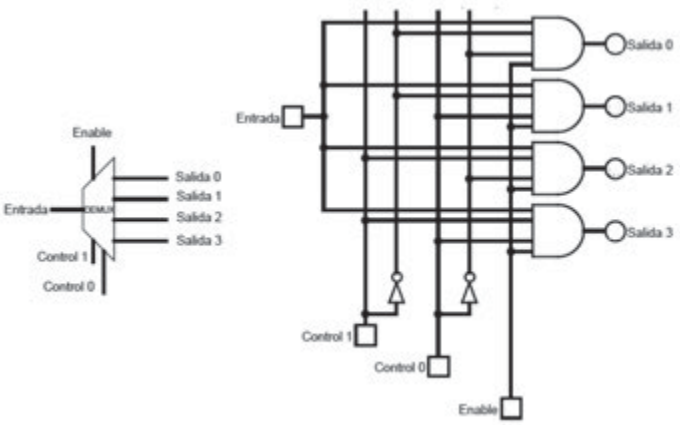


***Figura 1.17**. A la izquierda, la descripción de un demultiplexor a nivel de bloques. A la derecha, la implementación de un demultiplexor a nivel de puerta lógica*

ACTIVIDADES 1.9

- ¿Cuántas entradas de control son necesarias para seleccionar los datos presentas en un demultiplexor de seis entradas?

1.4.1.3 Decodificadores

Los **decodificadores** son circuitos combinacionales que activan una única salida dependiendo del valor de las entradas. Se caracterizan por tener n entradas y 2^n salidas. Estos circuitos activan la salida correspondiente al número en binario puro codificado en la entrada. Su comportamiento es similar al demultiplexor salvo que el valor que toma la salida activada siempre es 1. Al igual que en todos los circuitos anteriores podemos añadir una señal de activación o *enable*. Si dicha señal toma el valor 1, el circuito se comportará de la forma ya descrita y si toma el valor 0 todas las señales de salida tomarán el valor 0 también. Como sucede con los demultiplexores (y con cualquier circuito que tenga más de una salida), se deberá definir una función lógica por cada una de sus salidas.

Tabla 1.10. Tabla de verdad de un decodificador 1 a 4

Entradas			Salidas			
Control 1	Control 0	*Enable*	Salida 0	Salida 0	Salida 0	Salida 0
0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0
0	1	1	0	1	0	0
1	0	1	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	1

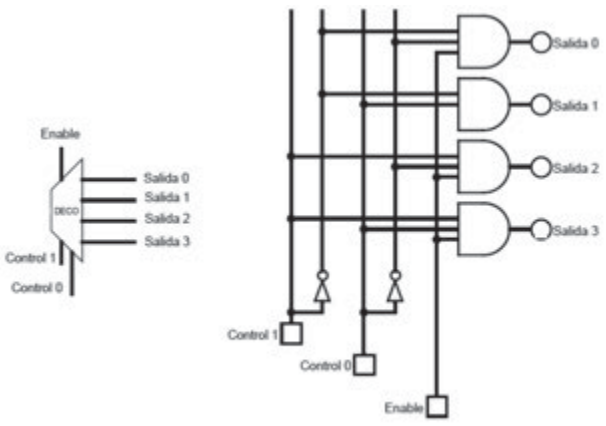


Figura 1.18. *A la izquierda, la descripción de un decodificador a nivel de bloques. A la derecha, la implementación de un decodificador a nivel de puerta lógica*

De forma análoga a como se hacía con los multiplexores, los decodificadores pueden agruparse de forma jerárquica formando unidades con un mayor número de entradas. A continuación se muestra como construir un decodificador de 4 a 16 a partir de 2 decodificadores de 2 a 4.

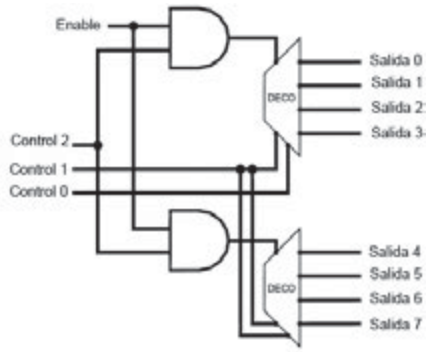


Figura 1.19. *Implementación de un decodificador 3 a 8 a partir de decodificadores 2 a 4*

Al igual que los multiplexores, los decodificadores también pueden utilizarse para implementar circuitos digitales a partir de tablas de verdad o de funciones en primera forma normal. La salida y_i de un decodificador toma el valor 1 cuando las entradas codifican en binario puro el valor de i, es decir, si conectamos las entradas del decodificador a las entradas de la función lógica, podemos asociar cada salida del decodificador con un minitérmino de la función. De esta forma solo tendremos que unir mediante una puerta OR todos los minitérminos que hagan 1 la función lógica. Si hay que implementar distintas funciones lógicas con las mismas entradas se podrá reutilizar el mismo decodificador para calcular los minitérminos de ambas funciones. La siguiente imagen muestra las implementación de las funciones $F(a, b, c)= a * b * c + a * b' * c'+ a' * b' * c'$ y $G(a, b, c)= a * b * c + a * b * c'$.

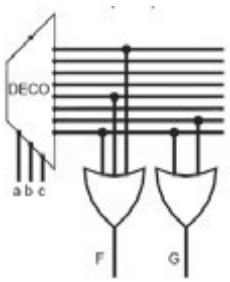


Figura 1.20. *Implementación de 2 funciones lógicas de 3 variables de entrada utilizando un decodificador de 3 a 8*

1.4.1.4 Codificadores

Un **codificador** es un dispositivo combinacional con 2^n entradas, n salidas y una señal de actividad A. Las salidas codifican en binario puro el único bit activo de las entradas. Si todas la entradas están desactivadas, todas salidas tomarán el valor 0 y la señal A también lo tomará. Si todas las señales de entrada menos una toman el valor 0, el codificador se comportará de la forma descrita y la salida A tomará el valor 1. Si están activas varias entradas, el valor de las salidas no es estable. Al igual que en el resto de componentes vistos, se puede añadir una señal *enable.* Si dicha señal toma el valor 0, todas las salidas del circuito (incluyendo la señal A) tomarán el valor 0.

Tabla 1.11. Tabla de verdad de un codificador 8 a 3 sin prioridad. La columna de las entradas indica que entrada está activa

Entradas		Salidas			
Entradas	*Enable*	Salida 0	Salida 1	Salida 2	Activación
-	0	0	0	0	0
X_0	0	0	0	0	1
X_1	0	0	0	1	1
X_2		0	1	0	1
X_3	0	0	1	1	1
X_4	1	1	0	0	1
X_5	1	1	0	1	1
X_6	1	1	1	0	1
X_7	1	1	1	1	1

La tabla de verdad anterior define el comportamiento de un decodificador de 8 a 3. A partir de la tabla anterior, se pueden obtener las siguientes funciones lógicas:

- ✓ $activación = enable * (x_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7)$
- ✓ $salida_0 = enable * (x_1 + x_3 + x_5 + x_7)$
- ✓ $salida_1 = enable * (x_2 + x_3 + x_6 + x_7)$
- ✓ $salida_2 = enable * (x_4 + x_5 + x_6 + x_7)$

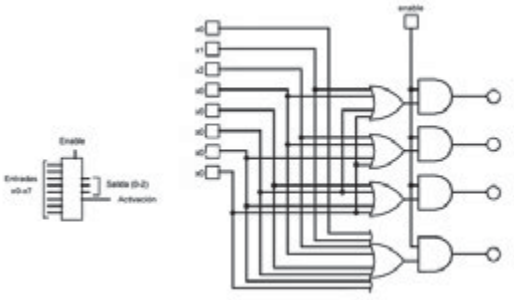


Figura 1.21. *Implementación de un decodificador de 8 a 3 sin prioridad*

Existen tipos de codificadores que permiten que más de una señal de entrada esté activa a la vez. Dichos codificadores reciben el nombre de codificadores con prioridad. En estos circuitos, la salida toma el valor de la entrada activa con mayor peso. Por ejemplo, si las entrada x_1 y x_3 toman en valor *1*, la salida y tomará el valor 3 por tratarse de la entrada con mayor peso. El diseño de este circuito es bastante sencillo. Solo hay que implementar un circuito que resuelva las prioridades de las entradas. A continuación se muestra dicho circuito para un codificador de 4 entradas.

Los codificadores son circuitos encargados de convertir una información expresada en un código a otro código diferente, por ejemplo, la información que se genera cuando se escribe en el teclado del ordenador debe ser convertida a binario para que el procesador la pueda utilizar.

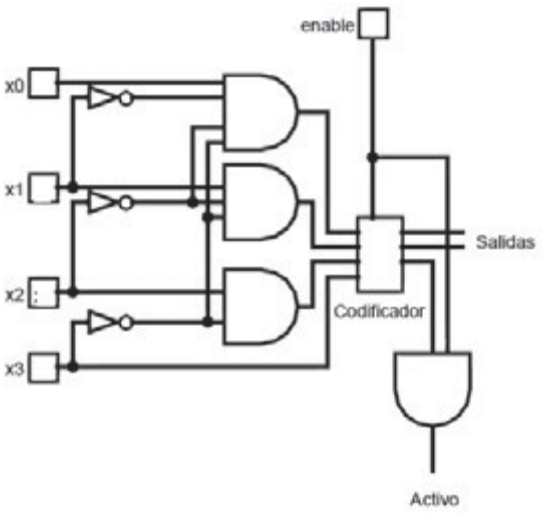


Figura 1.22. *Implementación de un decodificador de 8 a 3 con prioridad*

¿SABÍAS QUE...?

En inglés:
- Codificador: *encoder*.
- Decodificador: *descrambler.*
- Multiplexor: *multiplexer.*
- Demultiplexor: *demultiplexer.*

1.4.1.5 Otros bloques combinacionales

Además de los bloques descritos en los apartados anteriores existen numerosos más. Está fuera del ámbito de este libro describirlos todos. A continuación se presenta una lista con algunos de los ejemplos más importantes:

- **Desplazadores** o *shifters*. Son dispositivos con n+2 entradas y n salidas. Estos dispositivos permiten desplazar los bits de la entrada hacia la izquierda o hacia la derecha.

- **Comparadores**. Son dispositivos con 3 salidas que indican si dos operandos son iguales o bien si el primero es mayor que el segundo o bien si el segundo es mayor que el primero.
- **Detectores** o **generadores de paridad**. Estos dispositivos generalmente toman un valor 1 si el número de señales activas en la entrada es impar y un valor cero en el caso contrario. También existen dispositivos que funcionan de forma inversa: toman un valor 0 si el número de unos de la entrada es par y 1 si es impar. De la misma forma, podemos encontrar circuitos que detectan la paridad de las señales que tienen un valor de tensión bajo ó 0.
- **Sumador elemental** o *half adder*. Este componente suma dos entradas de un bit. Además de la suma de los dos bits genera otra salida indicando si se ha producido acarreo en la operación.
- **Sumador completo** o *full adder*. Este dispositivo suma dos entradas de un bit y un acarreo de entrada. Al igual que el *half adder* genera una salida con la suma de la operación y otra con el acarreo.

ACTIVIDADES 1.10

- ¿Cuáles son las diferencias entre un multiplexor y un demultiplexor?
- Diseñar la tabla de verdad, la función *booleana* y la descripción a nivel de puerta lógica de los siguientes circuitos combinacionales: un comparador, un detector de paridad, un sumador elemental y un sumador completo.

1.4.2 DISPOSITIVOS LÓGICOS PROGRAMABLES (PLD)

Los **dispositivos lógicos programables** se encuadran dentro de un conjunto de circuitos integrados formados por puertas lógicas y/o módulos básicos (tanto combinacionales como secuenciales), cuyas interconexiones pueden ser programas o bien por el usuario o bien por el fabricante. Este apartado se centrará en tres de los dispositivos lógicos programables más simples: las memorias ROM, los dispositivos tipo PLA y los dispositivos tipo PAL. Los distintos dispositivos se clasifican atendiendo a la flexibilidad con la que se programan y a su capacidad. Los circuitos que se verán a lo largo de este apartado se caracterizan por poseer entre 200 y 1000 puertas lógicas. Además de estos, se pueden encontrar dispositivos con mayor capacidad como pueden ser los dispositivos CPLD (matrices de dispositivos PLD interconectados) y dispositivos de tipo FPGA (compuestos de bloques lógicos sin interconexiones prefijadas).

ACTIVIDADES 1.11

- Buscar información adicional en el apéndice relacionada con los dispositivos lógicos programables.

1.5 CASO PRÁCTICO

En este caso práctico, se iniciará al lector en el montaje de circuitos reales. Para ello, se mostrarán los dispositivos y el manejo de algunos de ellos que deben emplearse a la hora de crear un circuito electrónico.

1.5.1 EL MULTÍMETRO DIGITAL

El **multímetro** digital o **tester** digital, es un instrumento electrónico de medición que generalmente calcula voltaje, corriente y resistencia. Dependiendo del modelo, también puede llegar a medir otras magnitudes como capacitancia y temperatura. Gracias a este dispositivo podemos comprobar el correcto funcionamiento de los componentes y circuitos electrónicos.

Figura 1.23 . *Multímetro digital*

Es muy importante leer el manual de operación de cada multímetro en particular, pues en él, el fabricante fija los valores máximos de corriente y tensión que puede soportar y el modo más seguro de manejo, tanto para evitar el deterioro del instrumento como para evitar accidentes al usuario.

De manera general, proveen dos terminales cuya polaridad se identifica mediante colores: negro con polaridad negativa (-) y rojo con polaridad positiva (+).

En las medidas de corriente directa (CD), la polaridad de los terminales debe ser observada para conectar apropiadamente el instrumento. Esta precaución no es necesaria para las medidas de corriente alterna (CA).

Poseen una llave selectora para elegir el tipo de medida a realizar:

- **Tensión eléctrica**: la unidad de medida es el Voltio (V). Pueden medir tanto voltajes en circuitos de corriente directa o continua, simbolizada como "DC" ó "-", como de corriente alterna, simbolizada como "AC" ó "~". Por ello, dependiendo del tipo de corriente, se debe elegir una de estas dos opciones en el correspondiente selector de funciones, también se debe escoger la escala y colocar las puntas de medición en los bornes apropiados.
- **Corriente eléctrica**: la unidad por el Sistema Internacional corresponde al Amperio, sin embargo, esta cantidad es muy grande para el tipo de mediciones a realizar. Es por ello que siempre la escala que se utiliza está en mili Amperios, (mA) la milésima parte de un amperio. Puede ser usado para medir corrientes en circuitos de *corriente directa* y de *corriente alterna*. Recuerda que se debe seleccionar la opción deseada, escoger la escala y colocar las puntas de prueba apropiadamente.
- **Resistencia**: la unidad de medida es el Ohm (W). Nunca debe conectarse a un circuito con la fuente de energía activada. En general, la resistencia debe ser aislada del circuito para medirla.

Con ayuda del profesor, coge una pila de 1,5 V algo gastada, para ver en qué estado se encuentra la misma. Para realizar la medición de voltajes, colocamos la llave selectora del multímetro en el bloque DCV (Voltaje de Corriente Continua), puesto que la pila constituye un generador de corriente continua.

Colocamos la punta roja en el electrodo positivo de la pila, la punta negra en el negativo. Apunta el voltaje resultante de la medición.

1.5.2 PLACAS DE INSERCIÓN

La **placa de inserción** es elemento sobre el que se montan todos los circuitos integrados, componentes pasivos y los cables para realizar las conexiones adecuadas entre ellos. Se utilizan para el montaje rápido de circuitos ya que no necesitan ningún tipo de soldadura.

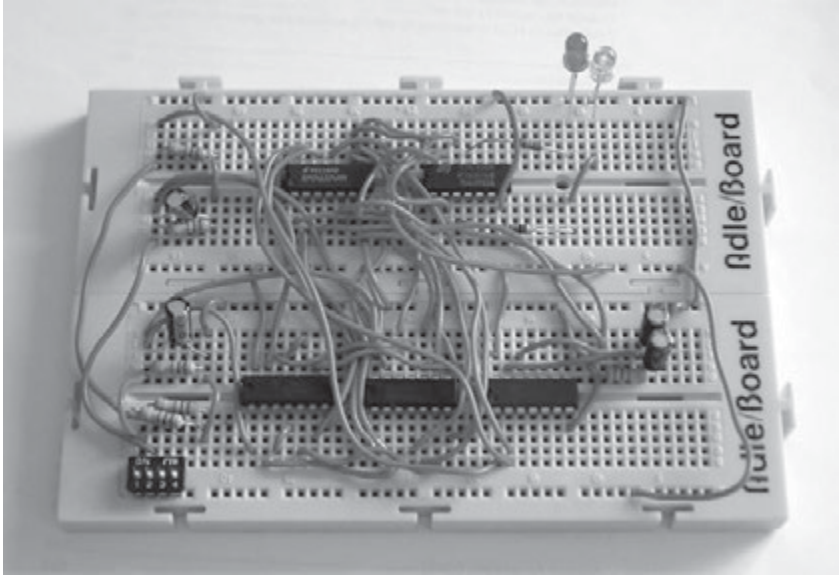


Figura 1.24. *Placa de inserción con componentes conectados*

Esta placa se forma a partir de una matriz de agujeros donde se pueden insertar los componentes por simple presión. Dichos agujeros poseen uniones eléctricas por la parte inferior de la placa de inserción, de manera que dos componentes que se pinchemos en dos agujeros unidos eléctricamente se comportarán como si se hubieran conectado entre sí.

En general, en la zona central de la placa se sitúan tiras de cinco contactos, unidos internamente entre sí para la conexión los diferentes componentes. En la parte lateral de la placa, se pueden encontrar tiras de mayor dimensión también unidas internamente entre sí. Estas tiras suelen estar reservadas para la alimentación del circuito.

Para establecer conexiones entre unas tiras y otras se utilizan cables de hilo rígido (a ser posible de diferentes colores) de un diámetro similar al de los huevos de la placa.

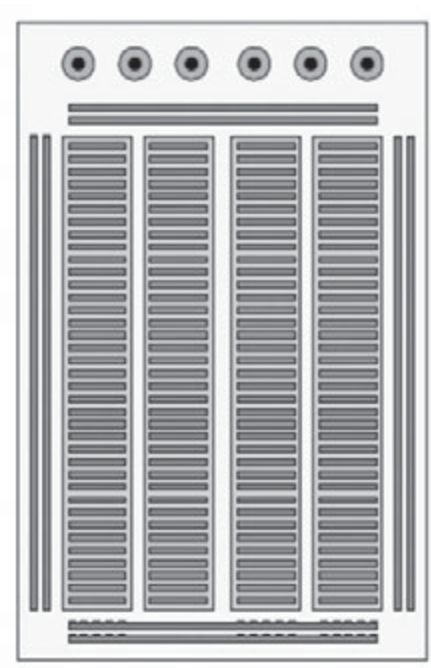


Figura 1.25. *Organización de una placa de inserción*

Los componentes integrados deben situarse sobre las divisiones entre tiras (tal y como se muestra en la figura 1.26), ya que en caso contrario los pines opuestos quedarían conectados entre sí.

Monta en el laboratorio los circuitos integrados 7408 y 7483. Comprueba su tabla de verdad utilizando el multímetro digital.

Con ayuda del profesor, coloca un componente integrado (por ejemplo, una puerta AND o una puerta OR), conéctalas de manera que la salida de una sea la entrada de la otra y analiza con el multímetro digital el resultado final. Recuerda, que la puerta lógica tomará el valor de 1 cuando le llegue corriente y la señal de 0 cuando no sea así.

Para un análisis más fácil del circuito, se recomienda la utilización de un componente integrado *Interruptor* para la entrada de señales y el uso de LED para visualizar la salida.

RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se introduce al lector en el diseño de sistemas electrónicos digitales definiéndolos como aquellos sistemas, construidos utilizando tecnología electrónica, capaces de tratar señales digitales. Las señales digitales son aquellas que representan la variación de una magnitud digital a lo largo del tiempo. Se pueden tratar señales analógicas utilizando circuitos digitales siempre y cuando éstas se conviertan a una señal digital utilizando un conversor A/D. La salida de estos sistemas también podrá ser digital siempre y cuando se transforme la señal de salida utilizando un conversor D/A.

En la actualidad, los circuitos digitales codifican la información que tratan de forma binaria, es decir, con dos valores: el 0 o valor falso y el 1 o valor cierto. Los distintos componentes electrónicos codifican estos valores mediante tensiones. Los valores de tensión utilizados dependerán de la tecnología.

Claude E. Shannon propuso el uso de las expresiones del álgebra de Boole en la descripción de circuitos digitales. De esta forma, el álgebra de Boole se convierte en una poderosa herramienta en la síntesis y análisis de estos circuitos. Las expresiones lógicas del álgebra de Boole pueden trasformarse directamente en circuitos digitales mediante puertas lógicas. Las puertas lógicas son componentes electrónicos que definen expresiones lógicas básicas. Las puertas lógicas se representan mediante símbolos gráficos, permitiendo describir circuitos mediante diagramas de flujo que conectan distintas puertas lógicas.

Una determinada función lógica puede representarse por medio de distintas expresiones lógicas (constantes y variables combinadas utilizando operadores). Las tablas de verdad y las expresiones lógicas permiten describir una determinad función lógica de forma única, facilitando el diseño de circuitos digitales.

Existen dos tipos de circuitos digitales. Los circuitos combinacionales y los circuitos secuenciales. En los primeros, la salida depende exclusivamente del valor de las entradas y en los segundos, también depende del estado del sistema, es decir, de los valores de las entradas en instantes anteriores.

- ✓ El diseño de los circuitos combinacionales se divide en las siguientes etapas:
- ✓ Definir la tabla de verdad de cada una de las salidas del sistema.
- ✓ Crear una expresión *booleana* que defina el comportamiento de cada una de las salidas.
- ✓ Operar con la función lógica para que se ajuste a los requisitos del sistema.
- ✓ Implementar la función lógica obtenida mediante puertas lógicas.

Las puertas lógicas pueden agruparse en componentes de más alto nivel que facilitan la síntesis de circuitos más complejos. Entre los componentes combinacionales básicos destacan: los mutiplexores, los demultiplexores, los codificadores, los decodificadores, los sumadores, los desplazadores y los detectores de paridad.

EJERCICIOS PROPUESTOS

1. Indique las ventajas e inconvenientes de los sistemas digitales frente a los analógicos.

2. Obtener el valor de las funciones lógicas se muestran a continuación para los valores de las entradas indicados:

- $F(a, b, c) = a + bc'$ si ($a = 0$, $b = 0$ y $c = 1$)
- $F(a, b, c) = a + (bc)'$ si ($a = 0$, $b = 0$ y $c = 1$)
- $F(a, b, c) = (a + b)\, c'$ si ($a = 0$, $b = 0$ y $c = 1$)
- $F(a, b, c, d) = (ac + db)\,(c'+d)'$ si ($a = 1$, $b = 0$, $c = 1$ y $d = 1$)

3. Transformar las siguientes expresiones en sumas de productos:

- $F(a, b, c, d) = (a + bc')d'$
- $F(a, b, c, d) = ((a + bc')d')'$
- $F(a, b, c, d) = (ab + bc')' + (cd)' + b$
- $F(a, b, c, d) = ((ad)' + bc')\,(a + d)\,(b + c)'$

4. Transformar las siguientes expresiones en productos de sumas:

- $F(a, b, c, d) = (a + bc')d'$
- $F(a, b, c, d) = ((a + bc')d')'$
- $F(a, b, c, d) = (ab + bc')' + (cd)' + b$
- $F(a, b, c, d) = ((ad)' + bc')\,(a + d)\,(b + c)'$

5. Simplificar las siguientes funciones utilizando los teoremas y propiedades del álgebra, el resultado deberá expresarse en suma de productos.

- $F(a, b, c) = (ab'+c)'\,(b+c)'$
- $F(a, b, c, d) = ((a+b)\,(a+c'))'+d(a+a'b+a'b')$
- $F(a, b, c, d) = ((a+c')'\,(b + d'))' + (c'+ d')'$

6. Obtener el complemento de las siguientes funciones en forma de sumas de productos.

- $F(a, b, c) = (a+ b')\,(a'+ c)\,(c'+ b')$
- $F(a, b, c, d) = (a + b + c'+ d')\,(b'+ d)\,(b'+ c')$

7. Obtener el complemento de las siguientes funciones en forma de productos de sumas.

- $F(a, b, c) = ab'+ a'c + c'b'$
- $F(a, b, c, d) = abc'd'+ b'd + b'c'$

8. Obtener la tabla de verdad de las siguientes funciones lógicas:

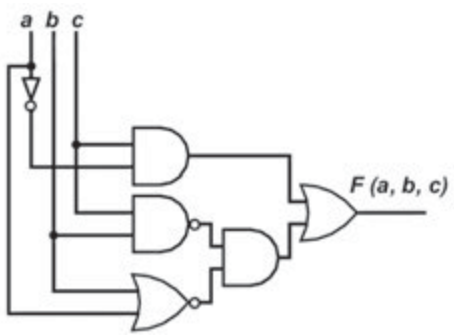
- $F(a, b, c) = a'b + (ac)'$
- $F(a, b, c) = a'(b + a)'+ c$

9. A partir de las tablas de verdad construidas en el apartado anterior obtener la primera y la segunda forma normal de las funciones *booleanas* del ejercicio 8.

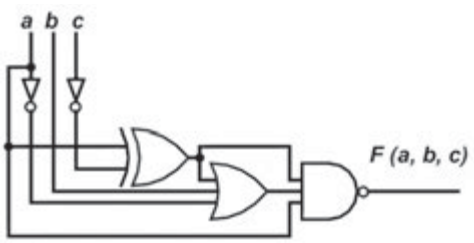
10. Implementar las siguientes funciones utilizando puertas lógicas:

- $F(a, b, c, d) = a'bd + acd' + dc'$
- $F(a, b, c, d) = a'(b + a)'d + c + d'$

11. Obtener expresiones *booleanas* equivalentes a los siguientes circuitos lógicos:



Circuito lógico A



Circuito lógico B

12. Operar con las siguientes expresiones algebraicas para que puedan ser implementadas utilizando exclusivamente puertas OR e inversores:

- $F(a, b, c) = abc+a'b'+c'$
- $F(a, b, c) = (a'+b+c')(a+b)c$

13. Construir la tabla de verdad de una puerta XOR de 2 entradas. A partir de la taba de verdad, obtener sus representaciones en primera y segunda forma normal. Implementar a nivel de puerta lógica las dos expresiones anteriores.

14. Construir la tabla de verdad de la función lógica $F(a, b, c)$ que da el valor 1 a los minitérminos 0, 5 y 7. Expresar esa función en segunda forma normal. Implementar el circuito equivalente a la expresión anterior utilizando puertas AND y OR de dos entradas e inversores.

15. Se desea diseñar un circuito con 4 bits de entrada y 5 de salida. El primer bit de salida S_0 tomará el valor uno si todos los bits de la entrada (a, b, c, d) toman el valor 0. El bit de salida S_1 tomará el valor 1 si alguno de los bits de la entrada toma el valor 1 y el resto se mantienen a 0. De la mima forma S_2 tomará el valor 1 si 2 bits de la entrada toman el valor 1 y el resto toma el valor 0 y S_3 tomará el valor 1 si y solo 3 bits de la entrada toman el valor 1. Por último, S_4 tomará el valor 1 si todos los bits de la entrada toman el valor 1.

- Construir la tabla de verdad de cada una de las salidas.
- Obtener las expresiones en primera y segunda forma normal de cada una de las salidas.
- Diseñar los circuitos que implementan cada una de las salidas utilizando puertas.

16. Se desea diseñar un circuito que indique si en los 3 bits de entrada los unos están salteados (combinaciones del tipo $a = 0$, $b = 1$, $c = 0$ o $a = 1$, $b = 0$, $c = 1$) o si dos o más unos son consecutivos (combinaciones del tipo $a = 0$, $b = 1$, $c = 1$ o $a = 1$, $b = 1$, $c = 0$). En el primer caso se activará una señal S_0 y en el segundo una señal S_1.

- Construir la tabla de verdad de cada una de las salidas.
- Obtener las expresiones en primera forma normal para cada una de las salidas.
- Diseñar el circuito que implemente la salida S_0 utilizando decodificadores de 3 a 8 y puertas OR.
- Diseñar el circuito que implemente la salida S_1 utilizando multiplexores de 8 a 1.

TEST DE CONOCIMIENTOS

1 Los sistemas electrónicos se dividen en analógicos y digitales:

a) Los dispositivos digitales solo procesan información digital, por este motivo su rango de aplicación es limitado.

b) Los sistemas digitales pueden utilizarse para procesar señales analógicas si éstas se discretizan utilizando conversores A/D, pero de ningún modo pueden devolver señales analógicas.

c) Los sistemas digitales pueden utilizarse para procesar señales analógicas si éstas se discretizan utilizando conversores A/D.

d) Los sistemas digitales pueden utilizarse para procesar señales analógicas si éstas se discretizan utilizando conversores D/A, pero de ningún modo pueden devolver señales analógicas.

2 Indicar cuáles de las siguientes magnitudes son digitales:

a) La diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito.
b) La temperatura de una habitación.
c) El número de libros de una biblioteca.
d) La posición de un interruptor con dos estados (encendido y apagado).

3 Indicar cuál de los siguientes elementos tiene naturaleza binaria:

a) La posición de un interruptor con dos estados (encendido y apagado).
b) El timbre de una casa.
c) La temperatura indicada por un termómetro digital.
d) Un testigo de avería en el frontal de un coche.

4 Indicar cuál de las siguientes afirmaciones es cierta:

a) Los sistemas electrónicos codifican la información binaria con un valor de tensión. Dicho valor depende de la tecnología.
b) Los sistemas electrónicos codifican la información binaria con un valor de tensión. Valores entorno a los 5 V se reservan para el valor lógico 0 y valores en torno a los 0 V se reservan para valores lógicos de 1.
c) Los sistemas electrónicos codifican la información binaria con valores de intensidad de corriente. Dichos valores dependen de la tecnología.
d) Ninguna de las anteriores es cierta.

5 Dada la expresión $a + 0 = a$, por el teorema de dualidad se puede aseverar que:

a) $a' + 0' = a'$.
b) $a * 0 = a$.
c) $a' * 1 = a$.
d) $a * 1 = a$.

6 Indicar cuáles de los siguientes conjuntos de puertas lógicas forman conjuntos universales (información contenida en los apéndices):

a) AND, OR y NOT.
b) NAND y NOT.
c) NAND.
d) AND y OR.

7 Indicar cuáles de las siguientes afirmaciones son ciertas:

a) Las expresiones en primera forma normal son únicas para una determinada función lógica.
b) Las expresiones en suma de productos son únicas para una determinada función lógica.
c) Toda función lógica puede expresarse en forma de productos de sumas.
d) Ninguna de las anteriores es cierta.

8 Indicar cuáles de las siguientes afirmaciones son ciertas:

a) A partir de 3 multiplexores de 4 a 1 puede construirse un multiplexor de 16 a 1.
b) Los multiplexores pueden utilizarse para sintetizar funciones lógicas a partir de su tabla de verdad.
c) Un multiplexor con n entradas dispondrá de $log_2(n)$ señales de control.
d) Un multiplexor con n entradas depondrá de 2^n salidas.

2 Circuitos lógicos secuenciales

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- ✓ Introducir el concepto de circuito lógico secuencial.
- ✓ Comprender el funcionamiento de los distintos tipos de biestables.
- ✓ Estudiar los circuitos lógicos secuenciales más estándar: contadores, divisores de frecuencia y registros.

2.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS SECUENCIALES

En este capítulo se van a introducir los **circuitos secuenciales**. Previamente, se han descrito los **circuitos combinacionales**, cuya salida en un instante determinado únicamente depende de los valores de las entradas en ese mismo instante (sin tener en cuenta el retardo de propagación que se produce entre la entrada y la salida). Además, esta característica implica que no puedan existir bucles en los circuitos. Sin embargo, esta característica supone una limitación ya que los sistemas combinacionales no son capaces de "saber" qué ha pasado antes. Los sistemas secuenciales se ocupan de rellenar este hueco.

En un sistema secuencial la salida en un instante determinado no solo depende de la entrada en ese instante sino que, así mismo, depende de las entradas en instantes previos. Este hecho implica que la salida del circuito debe ser realimentada. Todo este proceso puede verse como si a un circuito combinacional se le dotara de una memoria que almacena qué ha ocurrido previamente en el circuito. A esta memoria se le suele denominar estado. En la figura 2.1 se puede ver la diferencia expuesta entre los circuitos combinacionales y los circuitos secuenciales. En el caso de los sistemas secuenciales se puede observar que el circuito se caracterizará usando dos funciones: una para la salida (F_z) y otra para el cálculo del estado que se va a almacenar (F_s).

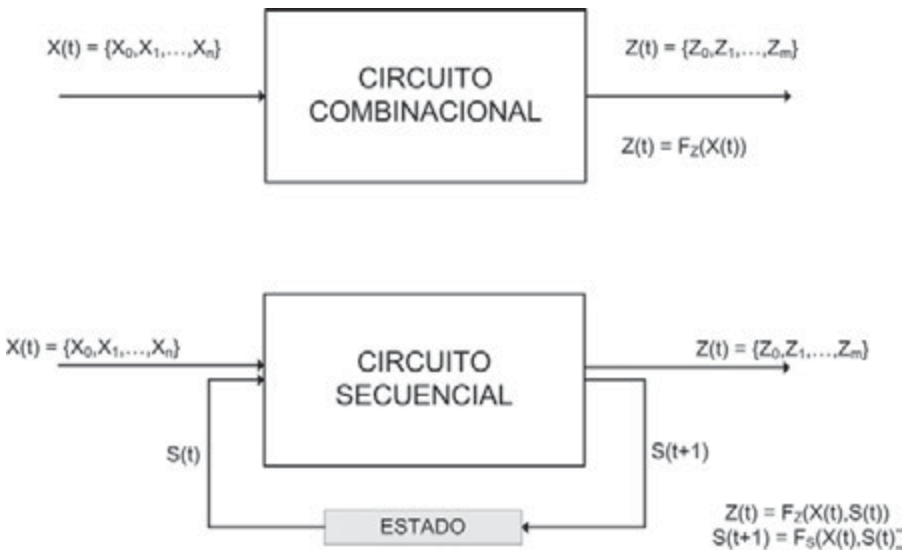


Figura 2.1. *Circuitos combinacionales frente a circuitos secuenciales*

Hasta ahora, lo circuitos que se han estudiado no requerían poder almacenar información, si embargo, como se ha visto los sistemas secuenciales sí. En este capítulo se van a describir los elementos de memoria más básicos y que permiten almacenar un bit de información. Estos elementos se denominan **biestables**. Posteriormente, se expondrán distintos bloques secuenciales estándar que se pueden construir usando como base más de un biestable.

2.2 SINCRONISMO

En el apartado anterior se ha hablado de instantes de tiempo, indicando que en un sistema secuencial la entrada en un instante determinado depende de la entrada actual y de los valores que han tomado esas entradas en los instantes anteriores. Esto provoca que el sistema tenga una memoria que almacena el estado en el que se encuentra. Este estado cambia con el tiempo y cuando esto ocurre se dice que el sistema secuencial transita. Por tanto, los sistemas secuenciales cambian en el tiempo, pero, ¿cuándo se produce ese cambio exactamente?

Existen dos tipos de sistemas secuenciales: **síncronos** y **asíncronos**. En los asíncronos las señales de salida cambian siempre que se produzca un cambio en la entrada o en el estado con la única restricción del tiempo de propagación a lo largo del circuito. Sin embargo, en los síncronos el sistema solo transita, es decir, cambia, cuando una señal externa se lo indica. Mientras esta señal de **sincronismo** no indique que hay que transitar, el sistema no tendrá en cuenta los cambios que se produzcan en la entrada. Por el contrario, cuando la señal de sincronismo así lo indique, el circuito tendrá en cuenta el valor de la entrada y calculará un nuevo valor para la salida y para el estado, produciéndose así la transición.

Esta señal de sincronismo se suele denominar también **señal de reloj**. Una señal de reloj es una señal periódica que se caracteriza por una secuencia de pulsos de nivel alto y bajo con una duración determinada. Una señal de reloj tiene las siguientes características:

- ✓ **Flanco**: un flanco de reloj se produce cuando el valor del mismo pasa de un nivel a otro. Puede haber flanco de subida (cuando pasa de nivel bajo a nivel alto) o flanco de bajada (cuando pasa de nivel alto a nivel bajo).
- ✓ **Pulso**: un pulso de reloj consiste en el tiempo comprendido entre dos flancos consecutivos, esto es, cuando el reloj mantiene un nivel alto o bajo. Si el flanco de inicio es de bajada y el de final es de subida se habla de pulso de nivel bajo. Si es justo al revés se habla de pulso de nivel alto.
- ✓ **Frecuencia y ciclo de reloj**: el ciclo de reloj es el tiempo que tarda el reloj en repetir su ciclo. Se puede medir entre dos flancos de subida consecutivos o dos flancos de bajada consecutivos. La frecuencia es la inversa del ciclo, midiéndose en Hertzios (Hz).

EJEMPLO 2.1

Si se tiene un ciclo de reloj de 100 ms (0,1 s) la frecuencia será de 1/0,1 = 10 Hz.

- ✓ **Simetría**: la simetría de una señal de reloj indica el porcentaje de tiempo que el reloj permanece en uno de los niveles. Lo normal es que el reloj sea simétrico (50% de simetría).

La Figura 2.2 muestra las características de una señal de reloj así como una señal de reloj que no es simétrica.

Cuando se usa una señal de reloj para sincronizar un sistema secuencial es necesario decidir qué característica del reloj se va a usar. Existen dos tipos:

- ■ **Sincronismo por nivel**: el sistema secuencial tendrá en cuenta la entrada únicamente cuando se encuentre en uno de los dos niveles posibles. De esta forma un sistema secuencial síncrono por nivel alto solo transitará

cuando la señal de reloj se encuentre en nivel alto. Generalmente una señal de reloj por nivel también se denomina señal de habilitación o **señal de enable**.

- **Sincronismo por flanco**: el sistema tendrá en cuenta la entrada únicamente cuando se produzca un flanco en la señal de reloj. Por ejemplo, un sistema secuencial síncrono por flanco de bajada solo transitará cuando en la señal de reloj se produzca un flanco de bajada.

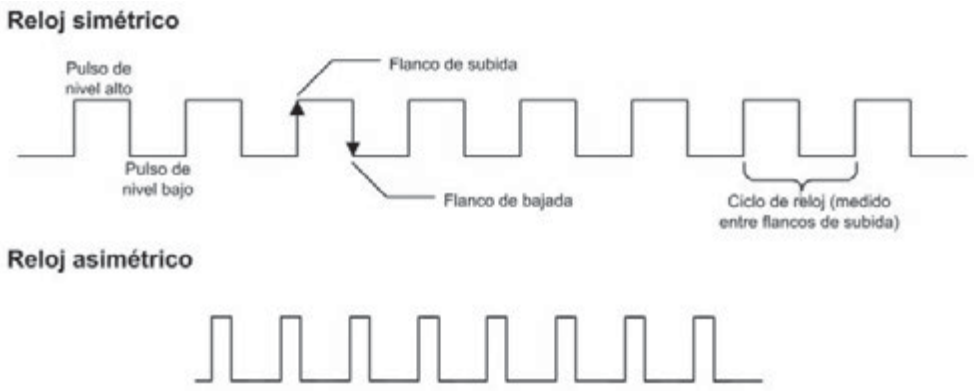


Figura 2.2. *Ejemplos de reloj simétrico y reloj asimétrico y sus características*

Los sistemas secuenciales síncronos son más fáciles de analizar y construir por lo que en este libro nos centraremos en este tipo de circuitos secuenciales.

2.3 BIESTABLES

Tal y como se ha mencionado en los apartados anteriores un sistema secuencial debe ser capaz de almacenar un estado que represente qué ha ocurrido anteriormente en el sistema. Los **biestables** son los elementos de memoria más básicos y que permiten almacenar un bit de información (dos estados). Para poder almacenar el estado se deberá usar un conjunto de biestables suficiente para poder representar el número de estados distintos posibles (con n biestables se podrán representar 2^n estados).

Los biestables se pueden clasificar atendiendo a distintas características:

- ✓ **Sincronismo**: los biestables como se ha visto previamente pueden ser síncronos o asíncronos. En el primer grupo los biestables pueden cambiar de valor únicamente cuando la señal de sincronismo (señal de reloj o *enable*) así lo indique, mientras que en el segundo cualquier cambio en la entrada del biestable puede afecta a la salida en cualquier instante de tiempo.
- ✓ **Tipo de disparo**: los biestables síncronos se pueden a su vez dividir en dos grupos dependiendo del tipo de evento que proporciona la sincronización. Como se ha visto antes podemos tener sincronismo por nivel (alto o bajo) o por flanco (de subida o bajada).

- ✓ **El número y tipo de entradas**: existen diversos tipos de biestables que se diferencian entre si en la forma en la que se indica como almacenar un bit. En este libro vamos a estudiar los más habituales, que son los biestables de tipo **D**, **S-R**, **J-K** y **T**. Como se explicará más adelante no todos los tipos de biestables tiene sentido construirlos tanto síncronos como asíncronos.

La Figura 2.3 muestra una representación de la clasificación y de las posibles fabricaciones de los tipos de biestables.

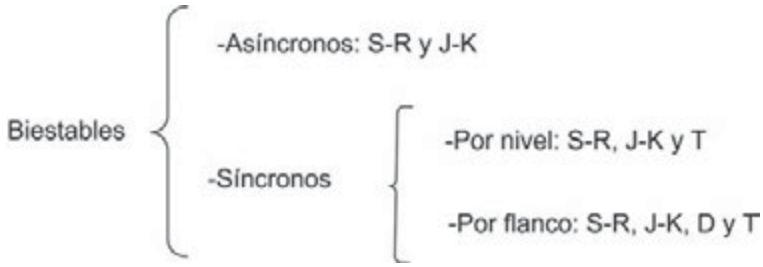


Figura 2.3. *Clasificación de biestables*

Antes de empezar a describir los distintos tipos de biestables es interesante destacar que los biestables síncronos generalmente tienen además entradas que actúan de forma asíncrona. Estas entradas suelen llamarse clear y preset y sirven para almacenar un 0 o un 1 respectivamente independientemente que la señal de sincronismo lo indique. Además, también hay que tener en cuenta que estas señales pueden ser activas a nivel alto o a nivel bajo.

2.3.1 BIESTABLE S-R ASÍNCRONO

El **biestable S-R** consta de dos entradas: S (*set*) y R (*reset*). La primera permite almacenar un 1 en el biestable y la segunda un 0. Cuando las dos señales no están activas el biestable mantiene el valor que estaba almacenando. Por último, en este biestable no pueden activarse las dos entradas a la vez. La tabla de verdad sería la siguiente:

S	R	Q(t+1)	
0	0	Q(t)	Se mantiene el valor
0	1	0	Reset (puesta a 0)
1	0	1	Set (puesta a 1)
1	1	----	Combinación prohibida

De aquí en adelante se usará Q para referirnos al valor que almacena un biestable. De esta forma $Q(t)$ es el valor en el instante actual y $Q(t + 1)$ el valor en el instante siguiente.

Si se desarrolla la tabla de verdad dejando como entradas S, R y $Q(t)$ se puede obtener la ecuación característica de este biestable:

$$Q(t+1) = \overline{R}Q(t) + S \tag{2.1}$$

A partir de la tabla de verdad se puede construir la tabla de excitación del biestable. Este tipo de tabla nos permite conocer que combinación de entradas hay que usar para almacenar un determinado bit en el biestable. Por tanto, en esta tabla se representa el dato almacenado en un instante, el dato que se quiere almacenar en el siguiente instante y la combinación de entradas que consigue que se produzca esa almacenamiento. Los valores indicados con X pueden tomar cualquier valor (0 o 1).

Q(t)	Q(t+1)	S	R
0	0	0	X
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	X	0

ACTIVIDADES 2.1

- Desarrollar la tabla de verdad y obtener la expresión lógica del biestable *S-R* (Ecuación 2.1).

2.3.1.1 Biestable S-R CON PUERTAS NOR

Una forma sencilla de implementar un biestable *S-R* es usar dos puertas NOR con sus salidas conectadas de forma cruzada tal y como se muestra en la siguiente figura:

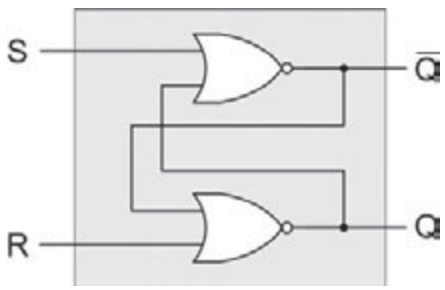


***Figura 2.4**. Biestable S-R con puertas NOR*

En esta materialización se puede ver que cuando se activan las dos entradas el biestable nunca termina de alcanzar un valor estable.

ACTIVIDADES 2.2

- Analizar paso a paso en la Figura 2.4 qué pasa cuando se activan las dos entradas a la vez.

2.3.1.2 Biestable S-R CON PUERTAS NAND

Otra implementación sencilla de un biestable *S-R* sería usar el mismo esquema expuesto anteriormente pero con dos puertas NAND en vez de las puertas NOR.

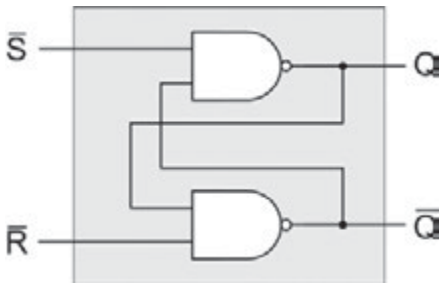


Figura 2.5. *Biestable S-R con puertas NAND*

El resultado que se consigue es el mismo, con la única diferencia de que las entradas *S* y *R* en este caso son activas a nivel bajo. Esto hace que la tabla de verdad sea diferente a la explicada previamente, ya que por ejemplo para activar la señal de set (*S*) habría que poner un 0. La tabla de verdad sería la siguiente.

S	R	Q(t+1)	
0	0	Q(t)	Combinación prohibida
0	1	0	Set (puesta a 1)
1	0	1	Reset (puesta a 0)
1	1	----	Se mantiene el valor

Así mismo la tabla de excitación sería diferente teniendo en cuenta esta tabla de verdad.

ACTIVIDADES 2.3

- Calcular la tabla de excitación para un biestable *S-R* con entradas activas a nivel bajo construido con puertas NAND.

2.3.2 BIESTABLE S-R SÍNCRONO POR NIVEL

En el biestable *S-R* que se ha descrito anteriormente la salida podía variar en cualquier momento dependiendo únicamente de la entrada actual (despreciando el retardo de las puertas). Sin embargo, como ya se ha mencionado previamente, hay ocasiones en las que se quiere forzar a que los biestables solo puedan transitar en determinados instantes de tiempo, es decir, hacerlos síncronos.

Un biestable síncrono por nivel es aquel que solo puede cambiar de estado cuando la señal de reloj o *enable* se encuentre en un nivel determinado. Por ejemplo, si el biestable es síncrono por nivel alto, éste solo podrá transitar de estado cuando la señal de reloj esté a nivel alto.

Por consiguiente, si incorporamos una señal de *enable* (*E*) a nivel alto la tabla de verdad de este biestable sería la siguiente:

E	S	R	Q(t+1)	
0	X	X	Q(t)	Señal de enable inactiva
1	0	0	Q(t)	Combinación prohibida
1	0	1	0	Set (puesta a 1)
1	1	0	1	Reset (puesta a 0)
1	1	1	----	Se mantiene el valor

Hay que tener en cuenta que la señal de *enable* puede ser activa a nivel alto como en la tabla de verdad anterior, pero también podría ser a nivel bajo comportándose justo de forma contraria.

Para construir un biestable *S-R* síncrono por nivel se puede partir de la implementación de la versión asíncrona y añadirle un circuito que realice la sincronización. La Figura 2.6 muestra dos posibles implementaciones de biestables *S-R* síncronos por nivel alto usando las dos versiones de *S-R* con puertas NOR y NAND. Por otro lado, si se quisiera que el biestable fuera activo por nivel bajo se podría añadir un inversor en la entrada de *enable*.

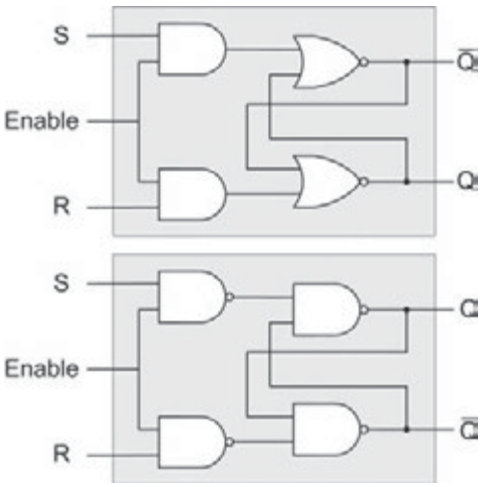


Figura 2.6. *Biestable S-R activo por nivel alto. Arriba partiendo de un S-R con puertas NOR y debajo de uno con puertas NAND*

ACTIVIDADES 2.4

- Dibujar el esquemático de un biestable *S-R* síncrono por nivel bajo.

2.3.3 BIESTABLE S-R SÍNCRONO POR FLANCO

Como se ha mencionado previamente, un biestable síncrono por flanco únicamente puede cambiar de estado cuando en la señal de reloj aparezca una transición entre nivel alto y nivel bajo (flanco de bajada) o entre nivel bajo y nivel alto (flanco de subida).

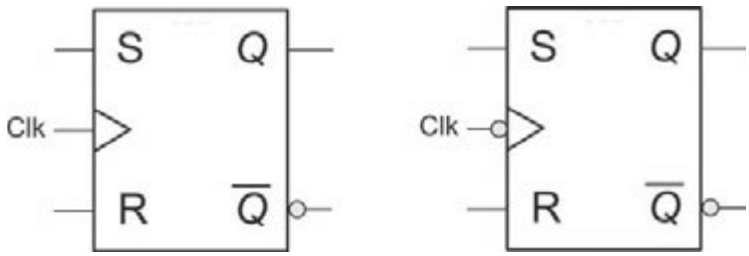


Figura 2.7. *Biestables S-R síncronos por flanco de subida (izquierda) y de bajada (derecha)*

Como se observa en la Figura 2.7, de forma gráfica un biestable síncrono por flanco se representa usando un triangulo en la entrada de reloj. Además, si es síncrono por flanco de bajada tendrá un circulo como en una señal activa a nivel bajo.

A continuación se muestra la tabla de verdad que resume el comportamiento de un biestable *S-R* síncrono por flanco de subida. Se ha usado el símbolo ↑ para representar el flanco de subida.

Clk	S	R	Q(t+1)	
No ↑	X	X	Q(t)	No se producen flancos de subida
↑	0	0	Q(t)	Combinación prohibida
↑	0	1	0	Set (puesta a 1)
↑	1	0	1	Reset (puesta a 0)
↑	1	1	----	Se mantiene el valor

Un biestable síncrono por flanco se puede construir a partir de un biestable síncrono por nivel añadiendo a la señal de reloj un detector de flancos. En la Figura 2.8 se muestra como construir un detector de flancos de subida. El circuito se basa en tener en cuenta el retardo que genera una puerta (en este caso el inversor) de forma que la señal de reloj y su inversa no llegan a la vez a la puerta AND provocándose así un pequeño pulso en la salida cuando en

el reloj aparece un flanco de subida. Además se recoge el cronograma asociado (recuérdese que un cronograma es la representación de la variación de las señales, eje de ordenadas, frente al tiempo, eje de abscisas).

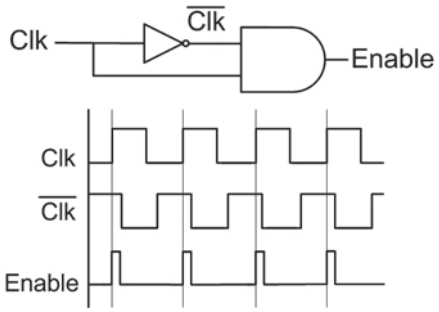


Figura 2.8. *Detector de flancos de subida con salida activa a nivel alto*

Este mismo esquema, pero cambiando la puerta de salida, puede usarse para construir un detector de flancos de bajada o si bien queremos que el pulso de reloj que se genera sea a nivel bajo.

Una vez que se tiene el detector de flanco se puede combinar con un biestable síncrono por nivel (alto o bajo dependiendo de la salida del detector de flanco que se use) para obtener un biestable síncrono por flanco (así mismo, será por flanco de bajada o por flanco de subida dependiendo del detector de flanco que se use).

La Figura 2.9 recoge un ejemplo de biestable síncrono por flanco de subida completo.

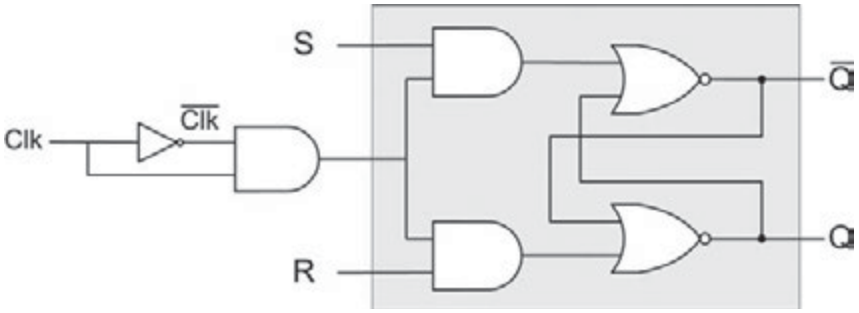


Figura 2.9. *Biestable S-R síncrono por flanco de subida*

ACTIVIDADES 2.5

- Construir un detector de flancos de bajada. La salida del detector se debe devolver tanto a nivel bajo como a nivel alto.

2.3.4 BIESTABLE D

El **biestable de tipo D**, o biestable seguidor, recibe su nombre de la palabra *delay* (retardo en inglés). Su funcionamiento es el más simple de todos, ya que consta únicamente de una entrada cuyo valor se carga en el biestable, independientemente del valor que tuviera este previamente.

Este tipo de biestable solo tiene sentido materializarlo de forma síncrona, tanto por nivel como por flanco.

Tanto la tabla de verdad como la tabla de excitación de este tipo de biestable son muy simples debido a la simple funcionalidad de los mismos. Por ejemplo, para un biestable *D* síncrono por nivel alto la tabla de verdad sería:

E	D	Q (t+1)	
0	*X*	*Q*(*t*)	Señal de *enable* inactiva
1	0	0	Puesta a 0
1	1	1	Puesta a 1

Y la función característica derivada de esta tabla de verdad sería $Q(t+1) = D$ y, si incluimos la señal de *enable*, sería:

$$Q(t+1) = DE + \overline{E}Q(t) \tag{2.2}$$

Un biestable *D* se puede construir fácilmente a partir de un biestable *S-R*, simplemente enviando la señal de a la entrada *S* y *D'* (se usará indistintamente la comilla y la barra para indicar la variable negada) a la entrada *R*. Esta materialización es válida tanto para realizar un biestable síncrono por nivel o síncrono por flanco, dependiendo del biestable *S-R* base que usemos. La Figura 2.10 muestra un ejemplo de ambos casos:

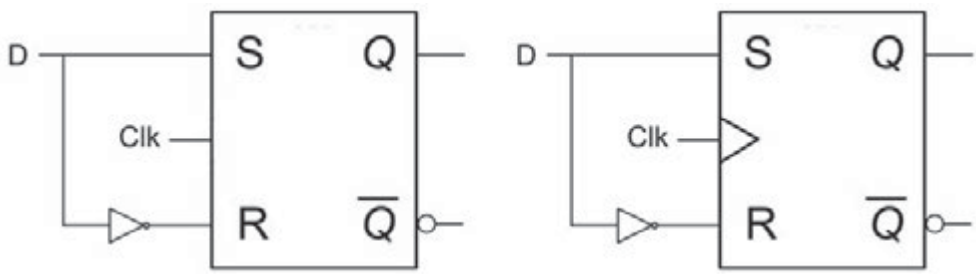


Figura 2.10. *Biestable D a partir de biestables S-R*

2.3.5 BIESTABLE J-K

Este tipo de biestables son similares a los biestables *S-R* ya que tienen dos entradas, *J* y *K*, que son asimilables a las entradas *S* y *R* respectivamente. La diferencia principal en cuanto a funcionalidad se refiere entre los biestables *S-R* y *J-K* es que en estos últimos la combinación de ambas entradas activas (recuerde que en *S-R* es una combinación prohibida) produce una inversión del valor almacenado en el biestable.

¿SABÍAS QUE...?

Los biestables *J-K* reciben su nombre en honor de Jack Kilby, uno de los padres de los circuitos integrados.

Este tipo de biestable se suele usar únicamente de forma síncrona ya que en la versión asíncrona, la combinación de ambas entradas activas produce una secuencia de cambios de estado que no se puede controlar en el tiempo al no haber sincronismo.

De esta forma, la tabla de verdad de un biestable *J-K* síncrono por flanco de subida sería la siguiente:

Clk	S	R	$Q(t+1)$	
No ↑	*X*	*X*	$Q(t)$	No se producen flancos de subida.
↑	0	0	$Q(t)$	Combinación prohibida.
↑	0	1	0	*Set* (puesta a 1).
↑	1	0	1	*Reset* (puesta a 0).
↑	1	1	$Q'(t)$	Se mantiene el valor.

A partir de la tabla de verdad, desarrollándola, se puede obtener la ecuación característica de un biestable *J-K*:

$$Q(t+1) = J\overline{Q} + \overline{K}Q$$

Un biestable *J-K* se puede construir de forma sencilla a partir de un biestable *D* teniendo en cuenta la función característica que se acaba de enunciar. La Figura 2.11 refleja esta posible materialización.

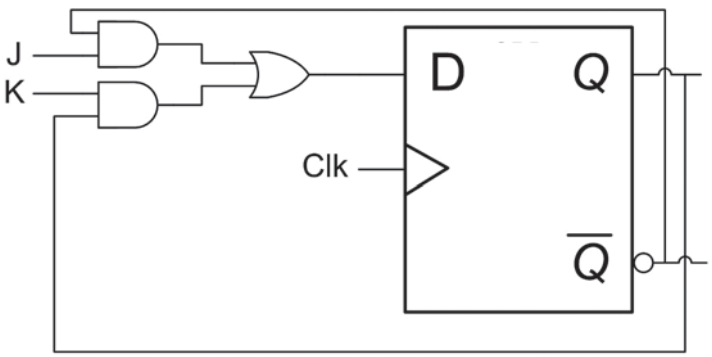


Figura 2.11. *Biestable J-K a partir de un biestable D*

También se podría construir un biestable *J-K* a partir de uno *S-R* simplemente añadiendo dos puertas AND que conviertan la combinación de ambas entradas activas en únicamente una de ellas activa como sería necesario en un biestable *S-R* (Figura 2.12).

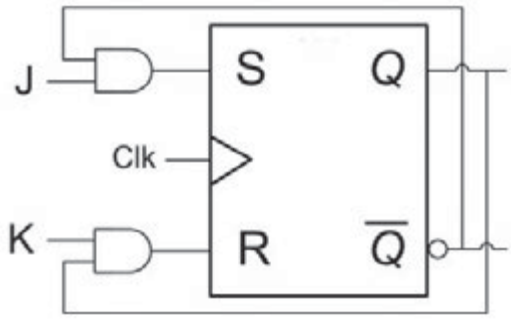


Figura 2.12. *Biestable J-K a partir de un biestable S-R*

Por último, se va a describir la tabla de excitación de los biestables *J-K*:

Q(t)	*Q*(t+1)	S	R
0	0	0	*X*
0	1	1	*X*
1	0	*X*	1
1	1	*X*	0

ACTIVIDADES 2.6

- Monta en el laboratorio el circuito integrado 7476 (componente que consta de dos biestables *J-K*). Compruebe su tabla de activación.

2.3.6 BIESTABLE T

El último tipo de biestables que se va a estudiar es el de tipo *T*, cuyo nombre proviene de la pabla *toggle*, que en inglés significa conmutar. La funcionalidad de este biestables es la de invertir el valor que tiene almacenado. Además, generalmente suele incluir una entrada de control denominada *T* que permite activar o no la función de conmutación o inversión del valor almacenado. De esta forma, si *T* está activa el valor del biestables se invertirá, mientras que si *T* permanece inactiva el biestables mantendrá el valor que tenía. Si el biestable no tiene entrada de control *T* funcionará como si *T* estuviera siempre activa, es decir, estará cambiando de estado constantemente.

Este tipo de biestables, al igual que los biestables *D* y *J-K*, solo tiene sentido materializarlos de forma síncrona por flanco.

Por ejemplo, la tabla de verdad de un biestables *T* síncrono por nivel alto son muy simples:

E	T	$Q(t+1)$	
No ↑	*X*	$Q(t)$	Señal de *enable* inactiva.
↑	0	$Q(t)$	Mantenimiento.
↑	1	$Q'(t)$	Inversión.

Sin tener en cuenta la ecuación característica de un biestables *T* con señal de control sería la siguiente:

$$Q(t+1) = T\overline{Q(t)} + \overline{T}Q(t) = T \oplus Q(t)$$

Una forma sencilla de construir un biestables *T* es partir de un biestables *J-K* y forzar siempre la combinación de ambas entradas activas de forma que se produzca la inversión del estado cuando el reloj así lo indique. Si se quiere tener la señal de control *T* será tan sencillo como conectar esta señal tanto a la entrada *J* como a la entrada *K*. De esta forma, cuando *T* está inactiva el biestable *J-K* estará en la combinación de mantenimiento mientras que cuando *T* esté activa el biestable *J-K* se encontrará en la combinación de inversión. La siguiente figura refleja ambos casos:

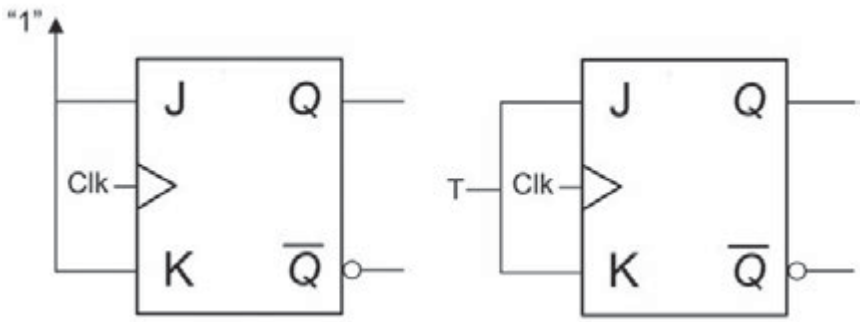


Figura 2.13. *Biestable T*

2.3.7 SEÑALES ASÍNCRONAS

Hasta ahora se han presentado biestables asíncronos y biestables síncronos. En estos últimos todas las entradas que permiten cambiar el valor del bit almacenado se encontraban sincronizadas con la señal de *enable* o la señal de reloj. Si embargo, en circuitos reales en numerosas ocasiones es necesario poder cambiar el valor del biestable independientemente de que la señal de sincronismo así lo indique. Por esto, es habitual encontrar en los biestables síncronos entradas que no lo son y que permiten poner el biestable a 1 o a 0 en cualquier instante de tiempo. Estas señales suelen llamarse *set* o *preset* para la puesta a 1 y *reset* o *clear* para la puesta a 0 y se pueden ser activas tanto a alto como a bajo nivel.

La Figura 2.14 muestra un biestable *S-R* con entradas de *preset* y *clear* activas a nivel alto. Es importante resaltar que no se deben activar las dos entradas asíncronas al mismo tiempo.

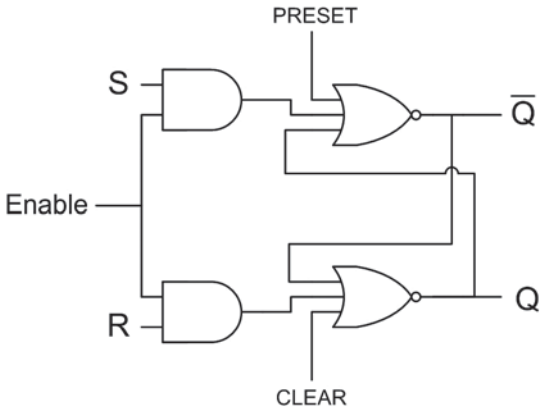


Figura 2.14. *Biestable S-R con entradas PRESET y CLEAR asíncronas*

ACTIVIDADES 2.7

- Diseñar un biestable *S-R* con entradas a bajo nivel (construcción con puertas NANDS) con entradas de PRESET Y CLEAR asíncronas.

2.4 BLOQUES SECUENCIALES ESTÁNDAR

Hasta ahora se han presentado los elementos de memoria más simples que se pueden, los biestables, que permiten almacenar un bit de información. En esta sección se van a exponer bloques estándar construidos a partir de biestables y que permiten realizar funciones más complejas. Los principales circuitos secuenciales que se van a presentar son contadores, divisores de frecuencia y registros.

2.4.1 CONTADORES

Los **contadores** son circuitos secuenciales que permiten obtener como salida una secuencia que se repite en el tiempo. Este tipo de circuitos se suele dividir en dos tipos: síncronos y asíncronos. La diferencia entre ambos es la señal de reloj que gobierna los biestables que forman el circuito. Cuando la señal de reloj es común a todos los biestables se habla de un contador síncrono, mientras que cuando los biestables no comparten la señal de reloj se habla de contadores asíncronos.

¿SABÍAS QUE...?

Los contadores son los bloques digitales más utilizados, estando presentes en la mayor parte de los sistemas digitales.

Además del sincronismo, los contadores se pueden diferenciar por otro tipo de características. A continuación se enumeran las más frecuentes:

- **Ascendente/descendente**: la cuenta puede ser ascendente o descendente. Además, el contador puede contar con una señal de control que permite en cualquier momento cambiar el sentido de la cuenta.

Los contadores descendentes no se utilizan tanto como los ascendentes. Su aplicación principal es en situaciones donde debe saberse cuando ha ocurrido un número deseado de pulsos de entrada. En estas situaciones el contador descendente se prefija al número deseado y luego se le permite contar hacia abajo cuando se aplican los pulsos. Cuando el contador llega al estado cero, es detectado por una compuerta lógica cuya salida indica que ha ocurrido el número prefijado de pulsos.

- **Completo/parcial**: los contadores pueden ser completos, queriendo decir esto que cuentan desde 0 hasta 2^n-1, siendo n el número de biestables que forman el contador. A este tipo de contador se le denomina contador modulo 2^n. Por otro lado, un contador puede ser parcial, realizando una cuenta desde un número a otro, ambos arbitrarios (siempre que con el número de biestables que se dispone se pueda representar ambos valores). A este tipo de contadores se les suele denominar también contadores *AB*.
- **Tipo de codificación**: los contadores pueden ser en binario puro pero así mismo se pueden implementar contadores que realicen cuentas en otro tipo de codificación como puede ser BCD, Gray, etc.

¿SABÍAS QUE...?

Uno de los contadores más utilizados es el contador BCD. Tiene únicamente diez combinaciones, desde 0000 a 1001. Se utilizan ampliamente en aplicaciones donde los pulsos o sucesos van a ser contados y los resultados exhibidos en algún tipo de dispositivo de visualización numérica decimal.

2.4.1.1 Contador asíncrono

Se habla de contador asíncrono cuando los biestables que forman el circuito no se encuentran gobernados por la misma señal de reloj. Una implementación sencilla de este tipo de contador se basa en usar biestables *T* (o lo que es lo mismo, biestables *J-K* con ambas entradas siempre activas) síncronos por flanco de bajada, conectados en serie de forma que la salida de un biestable entre en la entrada de reloj del siguiente. Esto provoca que en cada flanco

de bajada del reloj se produzca una propagación en los biestables consecutivos. La figura siguiente muestra una implementación de un contador asíncrono de 4 bits.

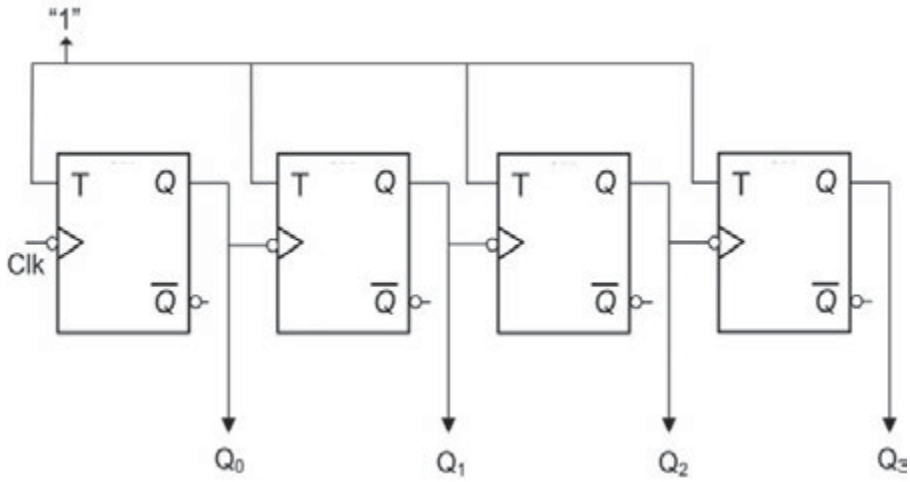


Figura 2.15. *Contador asíncrono basado en biestables T*

El funcionamiento de este contador queda reflejado en el cronograma de la Figura 2.16. Aunque en la figura solo se han representado los 9 primeros estados, se puede observar como la salida transitaría desde 0 (0000) hasta 15 (1111). Este cronograma no es realista desde el punto de vista de los retardos, ya que las salidas de los biestables que hacer la función de señal de reloj llevarían un retardo asociado.

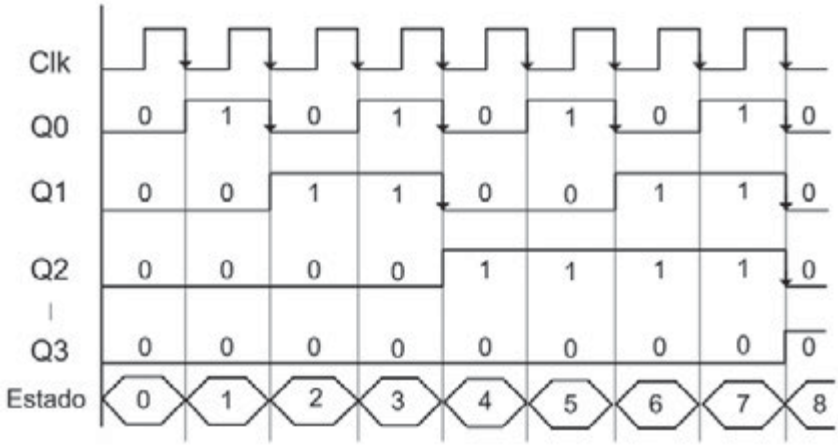


Figura 2.16. *Cronograma de un contador asíncrono*

ACTIVIDADES 2.8

- Diseñar un contador asíncrono usando biestables *J-K*.
- El componente integrado 74293, ¿qué dispositivo representa? ¿Es de la familia TTL o CMOS?

2.4.1.2 Contador síncrono

En un contador síncrono todos los biestables transitan en el mismo instante de tiempo (despreciando retardos) ya que la señal de reloj es la misma para todos ellos. En este tipo de contadores se usa siempre una señal de reloj por flanco que bien puede ser flanco de subida o flanco de bajada.

La estructura básica de un contador ascendente y modulo 2^n será bastante simple ya que constará de n biestables que codifican el estado en el que está la cuenta. Las salidas de los biestables serán las n salidas que tiene el contador. En cada flanco de reloj la cuenta aumentará en una unidad.

Una manera sencilla de diseñar un contador de este tipo es partir de n biestables *J-K* síncronos por flanco de subida y todos conectados a la misma señal de reloj. A continuación se pueden seguir los dos pasos siguientes para completarlo:

1. Se conectan las entradas *J-K* del primer biestable a 1.
2. Se conectan las entradas de los siguientes biestables al producto de las salidas anteriores. Esto es: $Ji = Ki = Q0 \cdot Q1 \cdot \ldots \cdot Q_{i-1}$.

La Figura 2.17 muestra el diseño obtenido siguiendo estos pasos para un contador de 0 a 15 (módulo 16). Para ello se han tenido que usar 4 biestables y dos puertas AND para los productos necesarios para el paso 2. El cronograma asociado a este contador es similar al presentado para los contadores asíncronos, excepto las entradas que en el asíncrono siempre están a 1 mientras que aquí han de calcularse a partir de las salidas de los biestables anteriores.

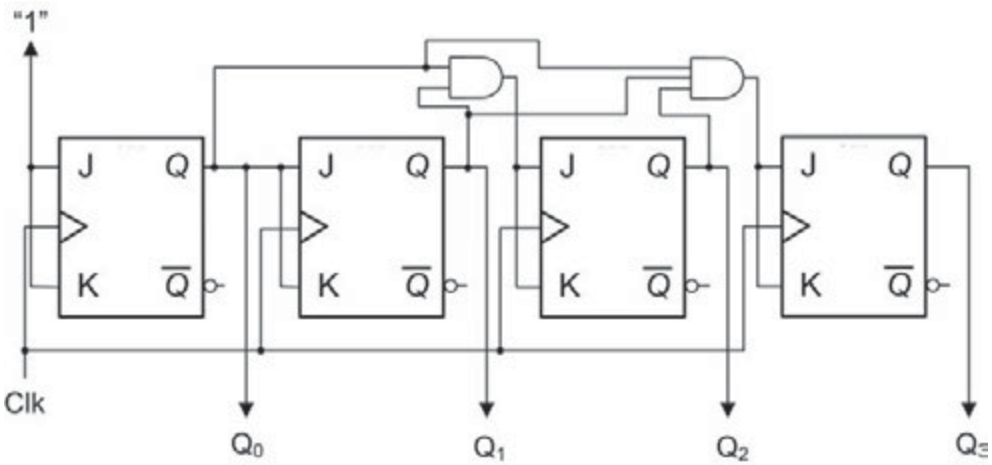


Figura 2.17. *Contador síncrono a partir de biestables J-K*

Si, por el contrario, se desea que la cuenta sea descendente se realizará el mismo método pero esta vez conectando las entradas *J* y *K* del biestable al producto de las anteriores salidas negadas.

EJEMPLO 2.2

Habitualmente, los contadores que se usan son contadores integrados en un circuito y que permiten hacer cuentas ascendentes o descendentes. Un ejemplo es el circuito integrado 74192. Este circuito es un contador cuyas entradas son las que se muestran en la Figura 2.18 y que permite realizar cuentas ascendentes y descendentes modulo 16. Además, tiene una entrada de carga asíncrona para seleccionar el estado en un momento determinado sin depender de la señal de reloj.

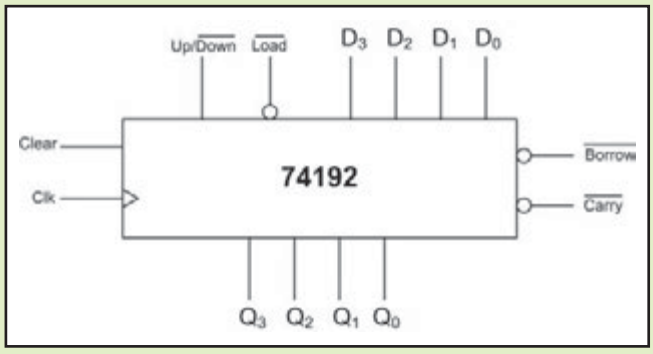


Figura 2.18. *Contador síncrono 74192*

La función que realiza representa cada entrada o salida está recogida en la siguiente tabla:

Entrada / Salida	Función
$Q_3Q_2Q_1Q_0$	Es una salida que representa el estado de la cuenta.
Load	Es una entrada a nivel bajo que permite cagar un valor (determinado por $D_4D_3D_2D_1$) en el contador. Es una entrada asíncrona.
$D_4D_3D_2D_1$	Es una entrada para indicar el dato que se cagará en paralelo siempre que la señal *Load* así lo indique.
Up / Down	Permite seleccionar cuenta ascendente (cuando esta señal está activa a nivel alto) y cuenta descendente (cuando está activa a nivel bajo).
Clear	Reinicia la cuenta a 0 de forma asíncrona.
Carry	Es una señal activa a bajo nivel que se activa cuando la cuenta se desborda por arriba. Es decir, cuando pasa del último al primer estado.
Borrow	Es igual que *carry* pero para cuentas descendentes. Se activa cuando se pasa del primer al último estado en una cuenta descendente.

2.4.2 DIVISORES DE FRECUENCIA

Un **divisor de frecuencia** es un circuito que devuelve como salida una señal de frecuencia menor que la señal de entrada. Un divisor de frecuencia se puede construir usando un contador modulo *N* y conectando la señal que se quiere dividir a la entrada de reloj del contador. De esta forma, cuando se llegue al último estado de la cuenta (*N*-1) se generará un pulso en la salida y esta salida generada tendrá una frecuencia *N* veces menor que el reloj de entrada. La Figura 2.19 recoge un ejemplo de divisor de frecuencia por 4.

¿SABÍAS QUE...?

Divisor de frecuencia es un circuito digital formado por una sucesión de contadores hasta obtener una frecuencia de 1 Hz, lo que permite mostrar segundos. Se utilizan para el diseño de relojes digitales.

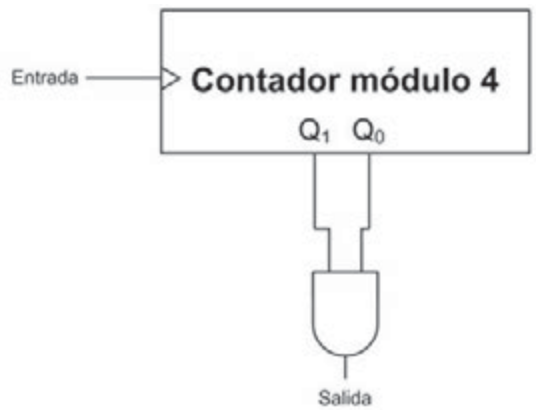


Figura 2.19. *Divisor de frecuencia 1 a 4*

ACTIVIDADES 2.9

- Dibujar el cronograma asociado al divisor de frecuencia propuesto.

2.4.3 REGISTROS

Un **registro** es una de las unidades más básicas de almacenamiento de información y generalmente permiten almacenar unos pocos bits. Están formados por tantos biestables como bits se quiera almacenar que trabajan de forma conjunta gobernados por la misma señal de reloj.

Una de las características más importantes de un registro es el tipo de acceso que se emplea para la lectura y la escritura de los datos que almacena: serie o paralelo. En este sentido podemos encontrar cuatro tipos de registros, si bien, existen algunos registros que permiten más de un modo de lectura y escritura:

- **Entrada en paralelo y salida en paralelo**: este tipo de registro permite tanto leer como escribir el dato que se quiera en un mismo ciclo de reloj. Para ello, deberá tener tantas entradas y salidas de datos como bits se quieran almacenar. Se usan para almacenar información.
- **Entrada en serie y salida en serie**: en este tipo de registros la operación de lectura o escritura empleará tantos ciclos como bits se desee leer o escribir ya que la lectura se realizará por una única salida y la escritura por una única entrada. Los bits que se escriben o se leen se irán propagando por los biestables. Al igual que el anterior se usan generalmente para almacenar información.
- **Entrada en serie y salida en paralelo**: en este tipo de biestable la entrada utiliza un único hilo y tantos ciclos de reloj como bits se quiera escribir mientras que en la salida se pueden leer todos los bits al unísono. Deberá tener, por tanto, tantos hilos de salida como bits se almacenen. Este tipo de registros se usa generalmente para realizar una conversión entre un sistema serie y otro paralelo.
- **Entrada en paralelo y salida en serie**: este tipo de registro es justo el contrario del anterior y así mismo se usa como registro de conversión, en este caso, entre un sistema paralelo y otro serie.

La Figura 2.20 muestra los cuatro diagramas básicos para los cuatro tipos de registros enumerados en la lista anterior.

En el resto del apartado se van a exponer algunos ejemplos de registros de los cuatro tipos anteriores y algunos registros que combinan varias características.

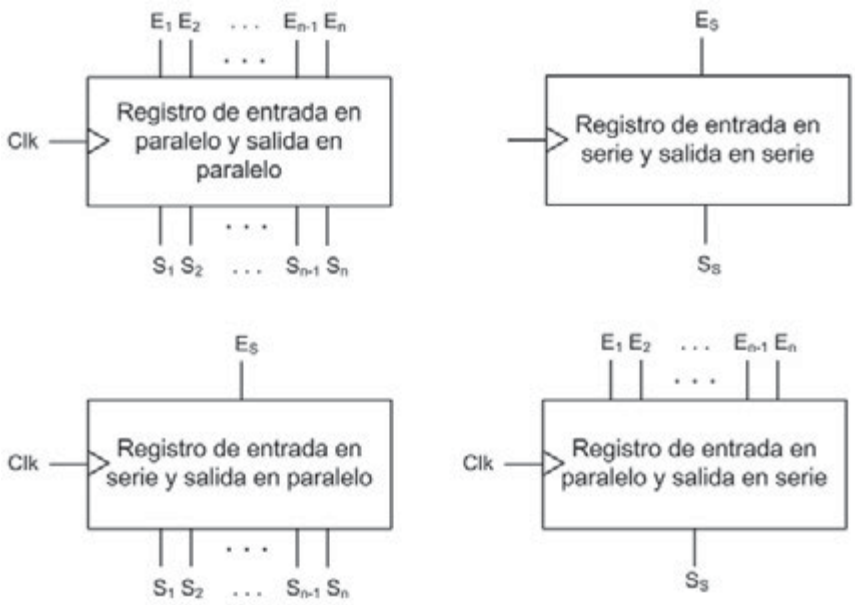


Figura 2.20. *Tipos de registros*

¿SABÍAS QUE...?

Existe un circuito en el mercado que se denomina *Registro Universal XX194*. Permite todos los tipos de registros de desplazamiento que se han enumerado. Para seleccionar el modo de funcionamiento, dispone de dos líneas de control que van conectadas a un multiplexor, estas líneas de control seleccionan la forma de conectar los biestables y así funcionar de una forma u otra.

2.4.3.1 Registro de entradas y salidas en paralelo

Este tipo de registros tiene tantas entradas y salidas como bits se quiera almacenar ya que tanto la lectura como la escritura se hacen a la vez en todos los biestables y en el mismo flaco de reloj. Por eso se dice que son de lectura (o escritura) en paralelo.

La Figura 2.21 muestra un ejemplo de registro de 4 bits con entradas paralelas y salidas paralelas construido usando biestables *D* síncronos por flanco de subida.

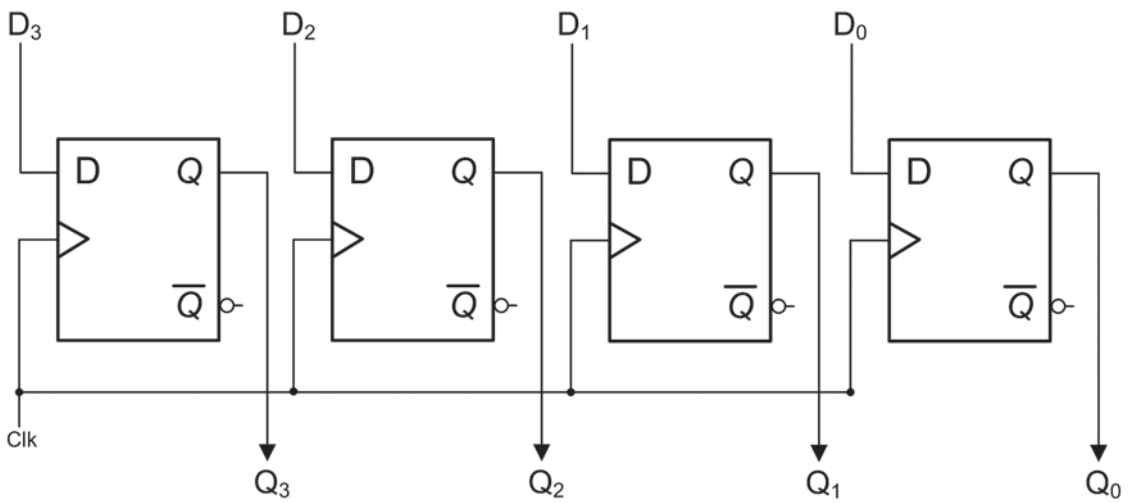


Figura 2.21. *Registro de entrada en paralelo y salida en paralelo*

ACTIVIDADES 2.10

- Estudia el funcionamiento del componente integrado 74164. ¿Cómo funcionan sus entradas?

2.4.3.2 Registro de entradas y salidas en serie

Estos registros también se llaman registros de desplazamiento ya que para poder leer o escribir en ellos los bits se tienen que propagar por los biestables. Si tenemos un registro de *n* bits (*n* biestables por tanto) serán necesarios *n* ciclos de reloj para ir desplazando los bits desde el primer al último biestable.

La Figura 2.22 muestra un ejemplo de registro de 4 bits de entrada serie y salida serie materializado usando biestables *D* síncronos por flaco de subida. La entrada serie se ha denotado con *ES* y la salida serie con *SS*. Es importante resaltar que el desplazamiento se produce hacia la derecha y es algo a tener en cuenta a la hora de leer o escribir los datos que se deseen.

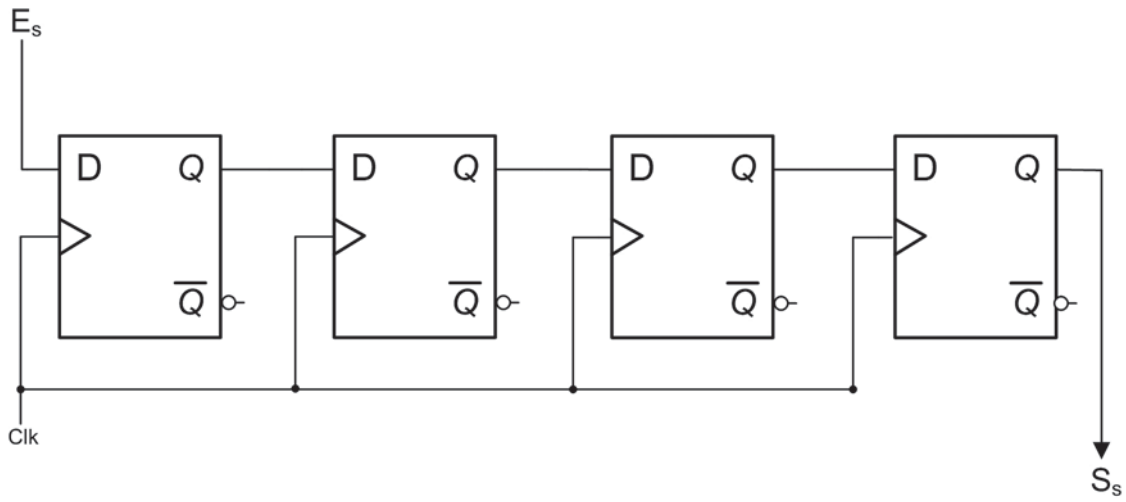


Figura 2.22. *Registro de entrada en serie y salida en serie*

2.4.3.3 Registros de conversión

Los **registros de conversión** son registros que permiten convertir de un sistema paralelo a uno serie o viceversa. Para ello constarán de o bien entrada paralela y salida serie, o bien de entrada serie y salida paralela. En el caso paralelo serán necesarias tantas entradas como biestables tengamos y para el caso serie será necesaria una única línea. El caso serie necesitará tantos ciclos como biestables se tengan mientras que en el caso paralelo se podrá operar en un único ciclo.

Por ejemplo, un registro conversor serie/paralelo de 4 bits necesitará 4 líneas de salida para poder leer en paralelo pero una única línea de escritura. En este caso la escritura requerirá 4 ciclos de reloj para ir almacenando y desplazando los bits, mientras que la lectura se podrá realizar en un único ciclo. La Figura 2.23 recoge un ejemplo de diseño de un registro como el que se ha descrito.

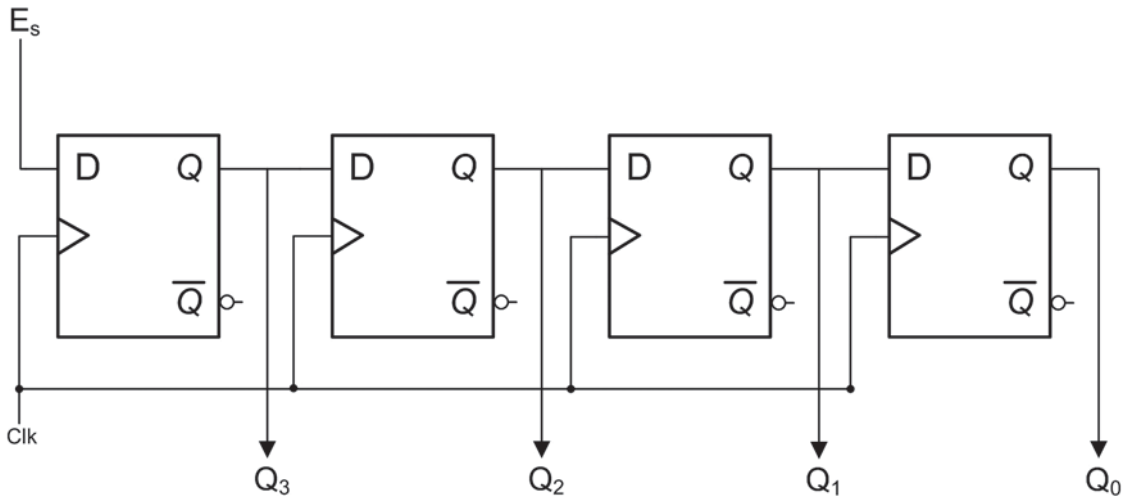


Figura 2.23. *Registro de entrada en serie y salida en paralelo*

¿SABÍAS QUE...?

En inglés se dice:

- Biestable: *bistable*.
- Contador: *counter*.
- Registro: *register*.
- Registro de almacenamiento: *latch register*.
- Síncrono: *synchronous*.
- Asíncrono: *synchronous*.
- Reloj: *clock*.
- Retardo: *delay*.

ACTIVIDADES 2.11

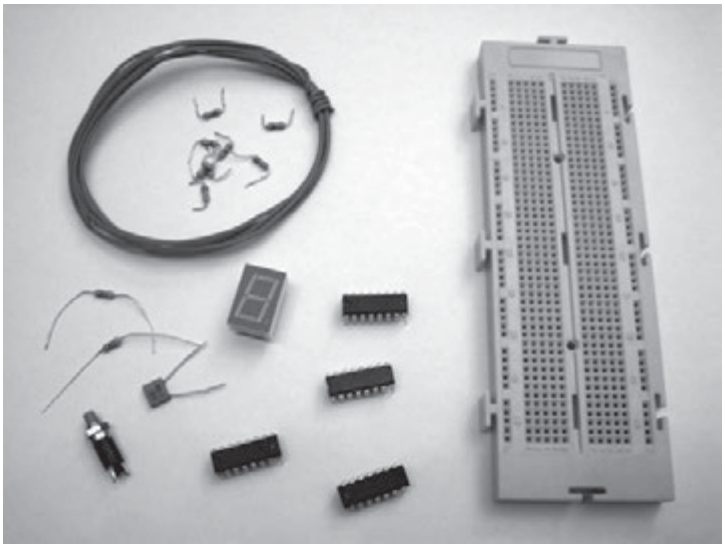
- Diseñar un registro de conversión de entrada en paralelo y salida en serie.

2.5 CASO PRÁCTICO

Se propone realizar un circuito secuencial contador modulo 8 usando biestables *D*. Para visualizar la salida se propone usar un *display* de 7 segmentos.

Los componentes necesarios son:

- ✓ Placa de inserción, cableado y una pila de 4,5 V (una fuente de corriente continua regulable a 5 V también serviría).
- ✓ 3 biestables *J-K* síncronos por flanco de subida (por ejemplo 2 circuitos integrados 74LS109) y 1 puerta AND (por ejemplo el circuito integrado 74LS08).
- ✓ 1 *display* de 7 segmentos
- ✓ 1 conversor de BCD a 7 segmentos (por ejemplo el circuito integrado 74LS247). Este conversor facilitará la generación de las entradas del *display*.
- ✓ 7 resistencias de alrededor de 220 Ω.
- ✓ Un pulsador de dos polos y los componentes necesarios para su conexión sin rebotes, esto es: un condensador de 1 nF y dos resistencias de 10 KΩ (ver explicación en los pasos a seguir).



Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Obtener (se pueden encontrar fácilmente en Internet) las hojas de características de los elementos necesarios para poder conocer en qué puertos se encuentran las salidas y entradas necesarias.
2. Construir el contador módulo 8 siguiendo las explicaciones dadas en este capítulo usando los biestables *J-K* y las puertas AND necesarias. Será síncrono por flanco de subida.

3 Conectar la salida de los biestables a la entrada del conversor BCD a 7 segmentos. Sobrará una entrada, ya que solo se podrá contar hasta 7, que se deberá conectar a "0" (tierra) (ver Figura 2.24).

4 Conectar las 7 salidas de conversor BCD a 7 segmentos al *display*. La conexión se puede hacer directamente pero es conveniente añadir un resistencia en medio de cada conexión (ver Figura 2.24).

5 Por último, es necesario generar una señal de reloj que indique cuando hay que transitar. Esta señal de reloj se puede hacer usando un pulsador, de forma que cuando se apriete el pulsador se genere un flanco de subida. Se puede comprar un pulsador que incorpore un circuito anti-rebotes (elimina ruido mecánico), o bien se puede diseñar un pequeño circuito que realice está función usando un condensador y una resistencia tal y como se muestra en la Figura 2.25. En el capítulo 4 se explicarán estos dos componentes y su funcionamiento.

6 Realizar las conexiones a tierra y a V_{cc} necesarias según se indique en las hojas de características.

7 Conectar la pila y probar que el contador funciona y que su valor se ve reflejado en el *display*.

Las entradas que no se usen deben conectarse al valor adecuado y nunca dejarlas si conectar porque se puede producir un comportamiento indeterminado. Por ejemplo, si los biestables tienen entradas asíncronas deberán conectarse a 1 si éstas son activas a nivel bajo.

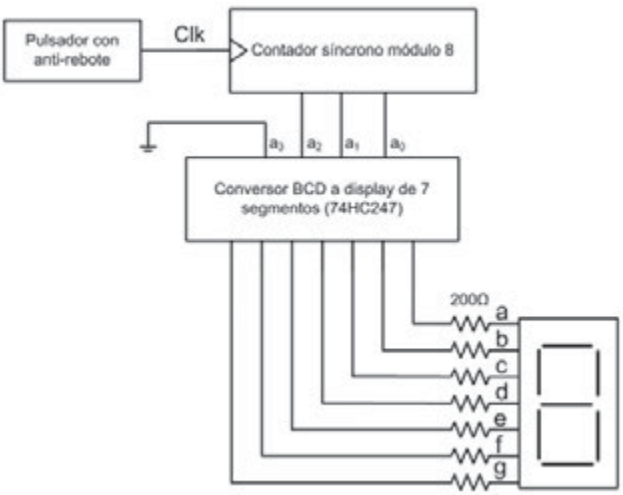


Figura 2.24. *Circuito propuesto para el ejercicio práctico*

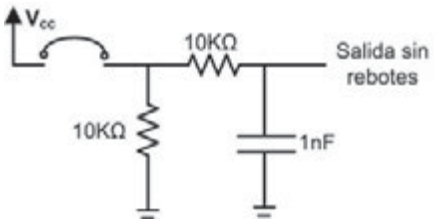


Figura 2.25. *Circuito anti-rebotes*

RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se ha introducido el concepto de circuito lógico secuencial haciendo hincapié en las diferencias existentes con respecto a los circuitos lógicos combinacionales.

Además, se han expuesto los distintos tipos de biestables (*S-R*, *J-K*, *D* y *T*) y su funcionamiento.

Por último, se han mostrado una serie de circuitos secuenciales estándar compuestos a base de biestables.

En concreto, se han detallado los contadores (asíncronos y síncronos), divisores de frecuencia y los registros (con entradas y salidas en paralelo y serie).

EJERCICIOS PROPUESTOS

- **1.** Dibujar los cronogramas correspondientes a cada uno de los tipos de biestables.
- **2.** Diseñar un contador síncrono descendente.
- **3.** Diseñar un contador síncrono que permita seleccionar entre cuenta ascendente y cuenta descendente (**Nota**: usar multiplexores 2:1 para seleccionar la entrada de los biestables).
- **4.** Combinar dos contadores 74192 para realizar una cuenta modulo 2^8.
- **5.** Utilizando un contador 74192, construir un contador de 3 a 8.
- **6.** Diseñar un registro que permita desplazar tanto a la derecha como a la izquierda (**Nota**: usar multiplexores para seleccionar la entrada de los biestables).
- **7.** Diseñar un registro universal que permita desplazar a la izquierda, desplazar a la derecha, mantener el valor y cargar en paralelo (**Nota**: usar multiplexores para seleccionar la entrada de los biestables).

TEST DE CONOCIMIENTOS

1 En un circuito secuencial la salida depende:

a) No depende, es constante.
b) Depende de la entrada únicamente.
c) Depende del estado únicamente.
d) Depende tanto del estado como de la entrada.

2 Si se tiene un reloj con ciclo de 1 ms, ¿cuál será su frecuencia?

a) 10 KHz.
b) 10 Hz.
c) 1 KHz.
d) Ninguna de las anteriores.

3 Un sistema secuencial síncrono podrá transitar cuando:

a) En cualquier instante de tiempo.
b) Solo cuando la señal de *enable* o de reloj lo indique.
c) Un sistema secuencial no transita.
d) Ninguna de las anteriores.

4 La diferencia entre un contador síncrono y uno asíncrono es:

a) La señal de reloj que usan los biestables.
b) Las entradas *J-K* son distintas.
c) Las entradas *D* son distintas.
d) No hay diferencia.

5 Un registro con entrada serie y salida paralela se usa principalmente para:

a) Almacenar gran cantidad de información.
b) Convertir un sistema de comunicación serie en uno paralelo.
c) Convertir un sistema de comunicación paralelo en uno serie.
d) Lo mismo que uno de entrada paralela y salida serie.

3 Representación de la información

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- ✓ Introducir al alumno en conceptos básicos relacionados con la codificación de la información.
- ✓ Profundizar en las codificaciones más utilizadas para representar datos numéricos.
- ✓ Entender que la naturaleza de la información a codificar determina el sistema a utilizar.
- ✓ Introducir otros sistemas de representación de la información.

3.1 INTRODUCCIÓN A LA REPRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Como se ha detallado en el capítulo anterior los sistemas digitales manejan información binaria. A la unidad mínima de información se le da el nombre de **bit** pudiendo tomar los valores {*0*, *1*}. Dada la limitación del bit para representar información que no sea bivaluada, el bit se agrupa en secuencias más largas llamadas códigos o palabras. Estas agrupaciones permiten codificar información de distinta naturaleza como, por ejemplo, datos numéricos, alfanuméricos, imágenes, sonido… o instrucciones (información que le indica al sistema que operaciones deber realizar). Una de las agrupaciones de bits más utilizadas es el octeto o *byte,* es decir ocho bits. Originariamente el tamaño del **byte** lo determinaba el tamaño de la palabra del computador, entendiendo como palabra el tamaño de bits que puede manejar en paralelo un determinado computador. Con el auge de los computadores de 8 bits el tamaño del byte quedo fijado.

Una **codificación** *establece las relaciones entre los elementos que se desean representar y las secuencias de bits que los representan.* En este capítulo se explicarán los fundamentos de la codificación digital de la información haciendo especial hincapié en la codificación de información numérica.

ACTIVIDADES 3.1

- Buscar en el apéndice información sobre los distintos tipos de codificaciones.

3.2 SISTEMAS DE REPRESENTACIÓN NUMÉRICA

Una codificación numérica se compone de un conjunto de símbolos llamados **dígitos** (en el caso de la información binaria llamados bits) y un conjunto de reglas que nos permiten combinarlos formando números. Además del conjunto de reglas que permite combinar los dígitos formando números, los sistemas de codificación numérica llevan asociado otro conjunto de reglas que nos permite operar con ellos.

Como probablemente el lector ya sepa, los números pueden clasificarse en números naturales, números enteros, números racionales, números reales y números complejos. Este capítulo se centrará en la codificación de números enteros y números reales y ocasionalmente en la codificación de números naturales.

¿SABÍAS QUE...?

Los números naturales son aquellos que nos permiten contar los elementos de un conjunto {1, 2, 3, 4...}. Aunque el cero no se considere un número natural, de aquí y en adelante cuando nos refiramos al conjunto de los números naturales añadiremos el 0. Los números enteros extienden el concepto de número natural añadiendo el cero y el concepto de número negativo {..., *-2*, *-1*, *0*, *1*, *2*,...}. Los números racionales extienden los números enteros con todos los números que pueden expresarse en forma de fracción, como por ejemplo, *-1/3*, *-1/5*, *-1/16*, *1/1*, *3/2*.... Los números reales extienden los números racionales con los números irracionales. Los números reales son aquellos que poseen una parte decimal que puede ser o no ser expresada en forma de fracción, por ejemplo, el número. Los números complejos extienden a los números reales añadiendo dos números imaginarios.

¿SABÍAS QUE...?

Existen multitud de sistemas de numeración como los sistemas vigesimales (de base 20, dedos de manos y pies) que fueron muy corrientes en la antigüedad. Los sistemas ternarios (base 3), fueron empleados por tribus que usaban las tres articulaciones de las falanges de los dedos para contar o los huecos que hay entre los dedos de la mano, trabajando en base 4.

Pero los sistemas de numeración que alcanzaron mayor difusión fueron los quinarios (base 5), debido a la facilidad para contar con los 5 dedos de la mano.

3.2.1 CONVERSIÓN ENTRE BASES

Generalmente los seres humanos utilizamos un sistema de numeración decimal. Este sistema está compuesto por *10* dígitos y combinándolos podemos representar cualquier número entero. Se dice que el **sistema decimal** es un sistema posicional porque el lugar que ocupa cada dígito en una cifra determina su valor. Por ejemplo, $6789 = 6 * 1000 + 7 * 100 + 8 * 10 + 9$, o lo que es lo mismo $6789 = 6 * 10^3 + 7 * 10^2 + 8 * 10^1 + 9 * 10^0$. Así de forma general, un número de n dígitos podrá expresarse como:

$$x_n \ldots x_2 x_1 x_0 = x * 10^n + \ldots + x * 10^2 + x * 10^1 + x * 10^0$$

Hasta ahora se ha estudiado como representar números enteros, pero también se pueden expresar número reales. Para ello, después de la parte entera se añadirá una coma seguida de una parte decimal. Calculándose el valor de la nueva cifra de la siguiente manera:

$$x_n \ldots x_1 x_0 , x_{-1} .. x_{-m} = x*10^n + \ldots + x*10^1 + x*10^0 + x*10^{-1} + \ldots + x*10^{-m}$$

Puede observarse que el valor o peso de un dígito depende del dígito, la posición que ocupa y del número *10*. Este número *10* es la base del sistema decimal. Recapitulando, el sistema en base *10* se compone de *10* dígitos (*0*, *1*, *2*, *4*, *5*, *6*, *7*, *8* y *9*). De forma general, un sistema en base *r* está compuesto por *r* dígitos y su valor viene determinado por la siguiente expresión:

$$(x_n \ldots x_1 x_0 , x_{-1} .. x_{-m})_r = x*r^n + \ldots + x*r^1 + x*r^0 + x*r^{-1} + \ldots + x*r^{-m}$$

Dada una cadena de dígitos en una determinada base, el dígito más a la izquierda de la secuencia, y por lo tanto el de mayor valor, recibe el nombre de dígito más significativo. Por el contrario, el dígito que ocupa la posición más a la derecha de la cifra, y por lo tanto el de menor valor, recibe el nombre de dígito menos significativo. En la cadena anterior, el dígito más significativo es el que ocupa la posición *n* y el menos significativo, el que ocupa la posición *m*.

Como ya se ha comentado anteriormente, la base específica el número de dígitos que podrán formar parte de los códigos expresados en dicha base. De esta forma, el sistema en base *2* está formado por los dígitos {*0*, *1*}, el sistema base *4* lo forman los dígitos {*0*, *1*, *2*, *3*}, el sistema base *8* u octal está formado por los dígitos {*0*, *1*, *2*, *3*, *4*, *5*, *6*, *7*}. Si una base es mayor que *10* sus dígitos, están constituidos por los dígitos del sistema base *10* más las letras del abecedario necesarias para completar el número dígitos de la base. Por ejemplo, el sistema en base *16* o hexadecimal está compuesto por los dígitos {*0*, *1*, *2*, *3*, *4*, *5*, *6*, *7*, *8*, *9*, *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F*}.

Como el lector ya se puede imaginar, se puede utilizar la base *2* para representar números en binario y la expresión anterior nos permite calcular el valor de número expresado en una base *2* en base *10*. Es más, esa expresión nos permite calcular el valor de un número expresado en cualquier base en base *10*.

EJEMPLO 3.1

$(101)_2 = 1 * 2^2 + 0 * 2^1 + 1 * 2^0 = (5)_{10}$

$(101,1)_2 = 1 * 2^2 + 0 * 2^1 + 1 * 2^0 + 1 * 2^{-1} = (5,5)_{10}$

$(AF,3)_{16} = 10 * 16^1 + 15 * 16^0 + 3 * 16^{-1} = (175,1875)_1$

Para convertir un número en base *10* a cualquier otra base *r* es necesario dividir la cifra en su parte entera y su parte decimal. Por ejemplo, para convertir el número $(7,625)_{10}$ a base 2, lo primero es dividir el número en su parte entera $(6)_{10}$ y su parte decimal $(0,625)_{10}$ y convertir cada parte por separado.

La parte entera se convierte dividiendo por la base destino *r*. El resto de la operación es el dígito menos significativo de la cifra en base *r*. Si el cociente o resultado es mayor que la base, se vuelve a dividir el cociente por la base *r*, siendo el nuevo resto la siguiente cifra más significativa. El proceso se repite hasta que se obtiene un cociente menor que el resto, dicho cociente es el dígito más significativo de la cifra en base *r*. En el ejemplo anterior, dividiríamos *6* entre *2*. El resto es *0* y el cociente *3*, siendo un *0* el dígito menos significativo de la cifra en base *2*. Como *3* es mayor que *2* (la base), se repite el proceso dividiendo *3* entre *2*. Ahora el resto y el cociente toman el valor *1*. El siguiente dígito toma el valor del resto *1*. Por último, se observa que el resto es menor que *2* y, por lo tanto, el dígito más significativo tomará el valor *1*. De esta forma el $(6)_{10}$ en base *2* tomará el valor $(110)_2$.

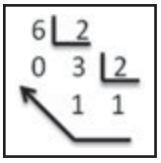


Figura 3.1. *Conversión del 6 en base 10 a base 2. Resultado (110)2*

El proceso para convertir la parte decimal se realiza mediante productos sucesivos por la base *r*. La parte entera del primer producto es el dígito más significativo de la parte decimal. El proceso se repite con la parte decimal resultante de la operación anterior. El algoritmo termina cuando la parte decimal se convierte en *0* o cuando se obtiene

la precisión deseada. Volviendo al ejemplo anterior, para convertir $(0,625)_{10}$ a base *2* comenzaremos multiplicando *0,625* por *2*. El resultado es *1,25*, por lo que el dígito más significativo de la parte decimal es *1*. El proceso continúa multiplicando la parte decimal *0,25* por *2*. El nuevo resultado es *0,5*, por lo que el nuevo dígito más significativo es un 0. Puesto que aún no se ha llegado a obtener un resultado exacto, el proceso puede repetirse multiplicando *0,5* por *2*, obteniéndose un *1*. De esta forma queda definido el siguiente dígito. Puesto que la parte decimal es *0*, el proceso termina.

Para pasar de una base *r* a una base *s* cuando ambas bases son distintas de la base 10, se deberá convertir el número expresado en base *r* a base *10* y, después, pasar el resultado de la operación a la base destino *s*.

EJEMPLO 3.2

Por ejemplo, si se desea convertir el número $(31)_5$ a base *2*, se pasará el número expresado en base *5* a base *10*, obteniendo $(16)_{10} = 3 * 5 + 1$. Mediante divisiones sucesivas obtenemos que el número $(16)_{10}$ se representa mediante el $(10000)_2$. Así pues, podemos concluir que $(31)_5 = (16)_{10} = (10000)_2$ $(101)_2 = 1 * 2^2 + 0 * 2^1 + 1 * 2^0 = (5)_{10}$

Los procesos de conversión entre bases se simplifican cuando las bases de partida *r* y de llegada *s* son una potencia de la otra, es decir, $s = r^k$ ó $r = s^k$ cuando $k > 1$. Estas técnicas se utiliza para convertir números entre binario y octal y entre binario y hexadecimal. Generalmente, los sistemas octal y binario se utilizan para mostrar la información binaria que procesan los sistemas digitales porque permiten mostrar grandes cadenas de dígitos binarios de forma muy compacta.

Para convertir un número *N* expresado en base *r* a base *s* siendo $s = r^k$ formaremos grupos de *k* dígitos de *N* en base r hacia los lados de la coma y sustituiremos cada grupo por el dígito equivalente en la base *s*. Si el número de dígitos a la derecha de la coma no es múltiplo de *k,* añadiremos ceros a la derecha del número hasta que el número de dígitos sea múltiplo de *k*. Por el contrario, si el número de dígitos a la izquierda de la coma no es múltiplo de *k,* se añadirán ceros a la izquierda del dígito hasta que los dígitos a la izquierda de la coma sean múltiplos de *k*. Esta regla permite convertir números en base *2* a números en base *8* y de números en base *2* a números en base hexadecimal. Para convertir un número de base *2* a base *8* se agruparan los dígitos de la cifra en base *2* en conjuntos de *3* elementos, desde la coma hacia la derecha y desde la coma hacia la izquierda. Si la última agrupación por la derecha o por la izquierda no pudiera completarse, se añadirán ceros hasta obtener conjuntos de *3* elementos ($8 = 2^3$). Por ejemplo, para convertir el número $(11010,11010)_2$ a base *8*, se comenzará agrupando los bits de la parte entera de la siguiente forma: primero se agruparán los bits menos significativos *010*, esta secuencia codifica un *2* en base *8*; después se agruparán los siguientes bits 11, como dicha agrupación no llega a *3* bits, añadimos un *0* por la izquierda, obteniendo la siguiente agrupación *011* que se codifica con un *3* en base *8*. De esta forma, la parte entera del número se representa con el $(32)_8$ en base 8. El mismo proceso deberá realizarse en la parte decimal comenzando por las agrupaciones con los bits a la derecha de la coma. La primera agrupación es *110* que se corresponde con el *6* en base *8*. La siguiente agrupación es de menos de *3* bits, por este motivo, se debe añadir un *0* a la derecha de esta agrupación quedando de la siguiente manera *100*. El *100* se corresponde con el *4* en octal. Así pues, la parte decimal del número anterior expresada en base *8* es $(0,64)_8$. Juntando la parte decimal y la parte entera obtenemos el número $(34,64)_8$ en base *8*. Para convertir el número anterior a base hexadecimal, se seguiría el proceso anterior pero ahora las agrupaciones serían de 4 bits en lugar de *16* ($16 = 2^4$). A la izquierda de la coma tendríamos las siguientes agrupaciones *0001* y *1010*. La agrupación *0001* se corresponde en hexadecimal con el dígito 1 y la agrupación *1010* se corresponde con del dígito *A*. De igual forma, a la derecha de la coma se forman las siguientes agrupaciones *1101* y *0000*; la primera agrupación se codifica con el dígito *D* y la segunda con el *0*. Uniendo la parte entera y la parte decimal se obtiene que la representación de $(11010,11010)_2$ en base *16* es $(1A,D0)_{16}$.

Para convertir un número N expresado en base r a base s siendo $r = s^k$, sustituiremos cada dígito original de N en base r por los k dígitos equivalentes de la base s. Para pasar un número en octal a base *2*, se debe convertir cada dígito de la cifra en base *8* en la secuencia de *3* bits que lo representa. De esta forma, el número $(27,4)_8$ se codifica en binario como $(010\ 111,100)_2$ ya que $(2)_8 = (010)_2$, $(7)_8 = (111)_2$ y $(4)_8 = (100)_2$. De la misma forma, para convertir un número en hexadecimal a base *2* se debe convertir cada dígito del número en hexadecimal en la secuencia de *4* bits que lo codifica. Para convertir el número $(F,B3)_{16}$ a binario, se codifican cada uno de sus dígitos por separado $(F)_{16} = (1111)_2$, $(B)_{16} = (1011)_2$ y $(3)_{16} = (0011)_2$ y por último se unen todos los bits formando la cifra final $(1111,10110011)_2$.

Para facilitar la conversión entre números en base *2* y base *8* y entre números en base *2* y base *16* puede utilizarse la siguiente tabla en la cual se codifican los números dígitos octales y hexadecimales en base *2*.

Tabla 3.1. Correspondencia entre las bases 2, 8, 16 y 10

Decimal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Hexadecimal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
Octal	0	1	2	3	4	5	6	7	8							
Binario	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111

3.2.2 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE REPRESENTACIÓN NUMÉRICA EN BASE 2

Los sistemas digitales a diferencia del ser humano, que puede trabajar de forma abstracta con códigos de longitud variable de casi cualquier longitud, solo trabajan con codificaciones de longitud fija. Así pues, las codificaciones binarias vienen caracterizadas por longitud prefijada.

Dependiendo del sistema de representación y del número de bits utilizados, una codificación se caracteriza por su rango, resolución y su precisión. El **rango** se define como *el intervalo entre el mayor y el menor número representable.*

EJEMPLO 3.3

Si se utilizase una codificación en base *2* con *4* bits, el menor número representable sería $(0000)_2$ y el mayor el $(1111)_2$, es decir, el rango de esta codificación en base *10* sería $[0,15]$. De forma general, el rango de una representación en base *2* (o binario puro) será $[0, 2^n-1]$, siendo n el número de bits utilizados.

La **resolución** se define como *la diferencia entre dos elementos representables y consecutivos.* En la codificación anterior (binario puro con 4 bits), la resolución era de *1* puesto que entre dos números consecutivos cualesquiera la diferencia será de uno. Por ejemplo, $(0001)_2 = (0011)_2 - (0010)_2$. En este ejemplo, la resolución es constante en todo el rango pero, como se estudiará más adelante, esto no es cierto para todas las codificaciones.

La **precisión** es un concepto íntimamente relacionado con la resolución y puede definirse como *el error cometido al codificar números no representables de forma aproximada.* Se pueden definir dos tipos de error: el **error absoluto** y el **error relativo**. El error absoluto E_a es la distancia o diferencia en valor absoluto entre el número que se desea representar X y su representación X': $E_a = |X - X'|$. Por otro lado, el error absoluto E_r depende de la cantidad que se desee representar y se define como el error absoluto dividido por la cantidad a representar: $E_r = E_a / X$.

El error no solo depende de la resolución, también depende de cómo se aproxime el valor que se desea representar. Esta aproximación recibe el nombre de **redondeo**. Existen cuatro tipos de redondeo: el truncamiento, el redondeo por defecto, el redondeo por exceso y el redondeo al más próximo. El redondeo por truncamiento toma la representación válida más cercana a *0*, el redondeo por exceso toma la representación más cercana a $+\infty$, el redondeo por defecto tomará siempre la representación más cercana a $-\infty$ y, por último, el redondeo al más cercano tomará la representación más cercana al número que se desea representar. La siguiente tabla muestra como se codificarían los números *-1,53*, *-2,45* y *2,45* si utiliza una representación en base *10* con solo un dígito decimal.

Los seres humanos utilizamos el sistema en base *10* para representar la información numérica. Si el rango que se desea representar no es muy grande ni muy pequeño, la representación se realiza en coma fija. En esta representación se utilizan *n* dígitos para la parte entera y *m* dígitos para la parte decimal. Por ejemplo, el número *10,4* utiliza 2 dígitos para su parte entera y 1 para su parte decimal y el número *-3,405* utiliza 1 dígito en su parte entera y 3 en su parte decimal.

Para representar números muy grandes o muy pequeños en coma fija se requeriría un número muy elevado de dígitos que dificultarían la manipulación y comprensión de la cifra. En estos casos se suele preferir el uso de la notación científica. En la notación científica, el valor de una cifra se determina por el valor de una mantisa *M,* multiplicada por el valor de la base (10, en la mayoría de los caso) y elevada a un exponente entero *Exp*: $M * 10^{Exp}$. Ejemplos: $1{,}5 * 10^{20}$; $6{,}78 * 10^{15}$…

Los sistemas digitales en lugar de utilizar la base *10* suelen utilizar la base *2*. Estas codificaciones en base *2* pueden clasificarse en dos tipos:

- **Coma fija**. Como se ha comentado anteriormente, los sistemas digitales utilizan codificaciones de longitud fija. En las representaciones en coma fija, los *n* bits que componen la representación se dividen en *p* bits para la parte entera y *q* bits para la parte decimal o fraccionaria. De esta forma, un número *X* se representaría como:

  $X = x_{p-1}, x_{p-2}, \ldots, x_1, x_0, x_{-1}, x_{-2}, \ldots, x_{-(q-1)}, x_{-q}$

  Como el lector se imaginará el valor del bit x_i vendrá determinado por su posición:

  $X = x_{p-1} * 2^{p-1} + \ldots + x_0 * 2^0 + x_{-1} * 2^{-1} + \ldots + x_{-q} * 2^{-q}$

EJEMPLO 3.4

Ejemplos de números en binario puro en coma fija para $p = 3$ y $q = 2$ ($n = p + q$):

- $(7{,}5)_{10} \Rightarrow (111{,}10)_2$
- $(5{,}25)_{10} \Rightarrow (101{,}01)_2$

- **Coma flotante**. Las representaciones en coma flotante son una generalización de la notación científica en base 10. En este tipo de codificaciones se reservan *p* bits para codificar la mantisa y *q* bits para codificar el exponente. La mantisa y el exponerte son números en coma fija. Además, el exponente carece de parte fraccionaria. De esta forma, un número en coma flotante:

  $X = x_{p+q-1}, \ldots, x_q, x_{q-1}, \ldots, x_0$ si

  $M = x_{p+q-1}, \ldots, x_q$ y

  $Exp = x_{q-1}, \ldots, x_1, x_0$

  el valor del número *X* podrá calcularse como: $X = M * 2^{Exp}$

ACTIVIDADES 3.2

- Buscar información adicional en el apéndice sobre la codificación de números reales utilizando formatos en coma flotante.

3.2.3 SISTEMAS DE REPRESENTACIÓN NUMÉRICA POSICIONALES EN COMA FIJA

Como se explicó en el apartado anterior, las codificaciones en coma fija de n bits se caracterizan por reservar p bits para codificar su parte entera y q bits para codificar su parte fraccionaria.

$$X = x_{p-1}, x_{p-2}, \ldots, x_1, x_0, x_{-1}, x_{-2}, \ldots, x_{-(q-1)}, x_{-q}$$

$$X = x_{p-1} * 2^{p-1} + \ldots + x_0 * 2^0 + x_{-1} * 2^{-1} + \ldots + x_{-q} * 2^{-q}$$

En este tipo de representaciones, dado un número cualquiera, el siguiente número representable puede calcularse sumándole el valor del bit menos significativo (2^{-q}), es decir, la resolución es constante en todo el rango y toma el valor del bit menos significativo 2^{-q}.

EJEMPLO 3.5

Se utilizan *5* bits para codificar un número en base *2*, de los cuales *3* se reservan para la parte entera y 2 para la parte decimal. Si se desea calcular el siguiente número a uno dado se le deberá sumar 2^{-2}, es decir, se le sumará *0,25*:

- $(001{,}11)_2 + (000{,}01)_2 = (010{,}00)_2$
- $1{,}75 + 0{,}25 = 2$

La precisión dependerá del número de bits que se utilicen en la parte fraccionaria q y de la técnica de redondeo. De esta forma, si se utiliza la técnica del truncamiento, del redondeo por exceso o del redondeo por defecto, el error absoluto E_a máximo será menor que 2^{-q}, mientras que si se utiliza redondeo al más próximo, el error será de $2^{-q/2}$. Por ejemplo, la representación del número $(0,\hat{9})_{10}$ en base *2* es $(0,\hat{1})_2$. Este número nunca podrá representarse de forma exacta porque se dispone de un número finito de bits. En la codificación del ejemplo anterior ($p = 3$ y $q = 2$), dicho número podrá representarse como el $(000.11)_2$ o como $(001.00)_2$. Si se utiliza el redondeo por defecto o el redondeo por truncamiento, se escogerá el $(000.11)_2$. En este caso, el error cometido será de $E_a = |(0,\hat{1})_2 - (0{,}11)_2| = (0{,}00\hat{1})_2 < (0{,}01)_2$. El siguiente número al $(0,\hat{9})_{10}$ es el 1 y éste si tiene representación exacta, por lo tanto, el error máximo que se puede cometer utilizando técnicas de redondeo de truncamiento y redondeo por defecto siempre será menor a $(0{,}01)_2$, es decir, 2^{-q}.

ACTIVIDADES 3.3

- Buscar ejemplos que justifiquen el umbral de error dado para redondeo al más próximo y redondeo por exceso.

Los números en coma fija se utilizan principalmente para codificar números enteros. En este caso, no se reserva ningún bit para la parte fraccionaria ($q = 0$) y el número total de bits se utilizan en la parte entera ($p = n$). De esta forma un número X, se representará como:

$X = x_{p-1}, x_{p-2}, \ldots, x_1, x_0$

De este modo, la resolución de un número entero es igual 1 (2^0) y el error máximo será de 0, puesto que se puede representar cualquier número entero de forma exacta, siempre y cuando esté dentro del rango.

El rango en coma fija dependerá de la codificación escogida. A continuación se detallan las codificaciones en coma fija más importantes.

3.2.3.1 Binario puro

Es la representación más sencilla en coma fija. Se caracteriza por no reservar ningún bit para codificar el signo. Por este motivo, esta codificación solo puede representar número positivos. Se basa en utilizar p bits para representar la parte entera y q bits para representar la parte decimal. De esta forma, el valor de un número X puede calcularse como:

$$X = \sum_{i=-q}^{p-1} x_i * 2^i$$

El menor número representable m es el 0 y la mayor cifra representable M es en la que todos los dígitos toman el valor 1 ($x_i = 1$ i $[p\text{-}1, \ldots, \text{-}q]$). Por tratarse de una representación en coma fija, la resolución es de 2^{-q}. Si se añadiese un bit más a la representación, la siguiente cifra es aquella cuyos dígitos toman el valor 0 excepto el más significativo que toma el valor 1 ($x_p = 1$ y $x_i = 0$ i $[p\text{-}1, \ldots, \text{-}q]$). Esta cifra toma el valor de 2^p y por lo tanto la cifra anterior M toma el valor $2^p - 2^{-q}$. Quedando definido el rango de estas representaciones como $[0, 2^p - 2^{-q}]$. Si se desean representar números naturales, q es igual 0 y p es igual a n, quedando el rango definido como $[0, 2^n - 1]$.

EJEMPLO 3.6

Los siguientes ejemplos muestran como codificar números expresados en base 10 con 6 bits en binario puro, utilizando 2 bits para la parte decimal y redondeo por truncamiento:

- $(2)_{10}$. Primero se convierte a binario puro $(10)_2$. A partir del número obtenido se rellena con 0, tanto por la derecha como por la izquierda, hasta alcanzar el número de bits de la codificación: $(0010{,}00)_2$.
- $(13.46)_{10}$. Primero se convierte a binario puro $(1101{,}011)_2$. Como no se puede representar el número de forma exacta en el sistema de codificación dado, se seleccionan los dos números en la codificación dada más cercanos: $(1101{,}01)_2$ y $(1101{,}10)_2$. Se selecciona el número $(1101{,}01)_2$ por ser el más cercano a 0.

ACTIVIDADES 3.4

- Montar un circuito que sume dos números de 4 bits en binario puro. Inicialmente, diséñalo a lápiz y papel y, posteriormente, y con la ayuda del profesor, créalo utilizando una placa de inserción.

3.2.3.2 Signo-magnitud

La representación anterior está muy limitada puesto que no es capaz de representar números negativos. La codificación en **signo-magnitud** reserva un bit (generalmente el más significativo) para codificar el signo. Si este bit toma el valor 0, el número codificado será positivo; por el contrario, si toma el valor 1, el número será negativo. Por lo tanto, en una codificación de n en signo-magnitud, se reserva un bit para el signo, p-1 bits para la parte entera, y q bits para la parte decimal. De esta forma, el valor de un número X cualquiera, podrá calcularse mediante la siguiente expresión:

$$X = (-1 * x_{p-1})_i \sum_{i=-q}^{p-2} x * 2^i$$

Puesto que se utiliza un bit para codificar el signo, el rango de los números positivos se reduce a la mitad, siendo el mayor número positivo representable M igual a $2^{p-1} - 2^{-q}$. Por el contrario, el menor número representable m tendrá el mismo módulo que el mayor número representable, pero el signo será contario ($m = -2^{p-1} + 2^{-q}$). De esta forma, el rango de un número en signo magnitud es igual a $[-(2^{p-1} - 2^{-q}), 2^{p-1} - 2^{-q}]$. Si se desea representar números enteros, q tomara el valor de 0 y p será igual a n, quedando definido el rango de la representación por el intervalo $[-(2^{n-1} - 1), 2^{n-1} - 1]$.

Uno de los principales problemas de esta representación es que es ambigua puesto que el 0 puede representarse tanto como un número positivo como por un número negativo.

EJEMPLO 3.7

En los siguientes ejemplos se codifican números en base 10 utilizando una codificación de 8 bits en signo-magnitud:

- $(0)_{10}$. Primero se convierte a binario puro $(0)_2$. Después se completa con 0 hasta alcanzar los 7 bits del módulo $(0000000)_2$. Por último, se añade el bit de signo. El cero puede verse tanto como un número positivo como un número negativo, por este motivo existen dos codificaciones válidas: $(00000000)_{sm}$ y $(10000000)_{sm}$.
- $(13)_{10}$. Primero se convierte a binario puro $(1101)_2$. Después se completa con 0 hasta alcanzar los 7 bits del módulo $(0001101)_2$. Por tratarse de un número positivo se añade un 0 como dígito más significativo: $(00001101)_{sm}$.
- $(-13)_{10}$. Primero se convierte a binario puro $(1101)_2$. Después se completa con 0 hasta alcanzar los 7 bits del módulo $(0001101)_2$. Por tratarse de un número negativo se añade un 1 como dígito más significativo: $(10001101)_{sm}$.

Para convertir números en signo magnitud a decimal se debe seguir el proceso contario:

- $(10000011)_{sn}$. Primero se separa el módulo del signo $(0000011)_2$. Después se convierte el número a base 10: $(3)_{10}$. Por último se le añade el signo, en este caso negativo: $(-3)_{10}$.
- $(00000011)_{sn}$. Primero se separa el módulo del signo $(0000011)_2$. Después se convierte el número a base 10: $(3)_{10}$. Por último se le añade el signo, en este caso positivo: $(3)_{10}$.
- $(-13)_{10}$. Primero se convierte a binario puro $(1101)_2$. Después se completa con 0 hasta alcanzar los 7 bits del módulo $(0001101)_2$. Por tratarse de un número negativo, se añade un 1 como dígito más significativo: $(10001101)_{sm}$.

3.2.3.3 Complemento a 1

Antes definir el **complemento a 1** como sistema de codificación es necesario definir la operación del mismo nombre. Dado un número X expresado en base r con p bits para la parte entera, se define la operación de complemento a la base restringido de X ($C_{r-1}(X)$) como la diferencia entre la base r elevada a p menos X menos el valor del bit menos significativo ($C_{r-1}(X) = r^p - X - r^q$). Si se aplica la operación de complemento a la base a números enteros, el complemento a la base restringida quedaría de la siguiente forma: $C_{r-1}(X) = r^p - X - 1$.

EJEMPLO 3.8

Por ejemplo, si se codifican números enteros con 4 bits, su complemento a la base restringida o complemento a 1 (por estar utilizando la base 2) será:

- $C_1(0000)_0 = 2^4 - 0 - 1 = 15 = (1111)_2$
- $C_1(1111)_0 = 2^4 - 15 - 1 = 0 = (0000)_2$
- $C_1(0110)_0 = 2^4 - 6 - 1 = 9 = (1001)_2$

En los ejemplos anteriores puede observase que el complemento a 1 de un número en base 2 puede calcularse de forma sencilla sustituyendo los ceros por unos y los unos por ceros en el número original. De esta forma, el complemento a 1 de 010001 será 101110. También se puede observar que el complemento a 1 del complemento a 1 de un número es el número original: $C_1(C_1(X)) = X$.

La operación de complemento a la base restringido se utiliza para codificar números enteros en binario de la siguiente forma: los números positivos se representan en binario puro y su bit más significativo debe ser siempre 0, los números negativos se representan como el C_1 de los números positivos y su bit más significativo es siempre 1.

EJEMPLO 3.9

Con 3 bits se pueden representar los siguientes números enteros en complemento a 1:

- $(011)_{C1} = (3)_{10}$
- $(010)_{C1} = (2)_{10}$
- $(001)_{C1} = (1)_{10}$
- $(000)_{C1} = (0)_{10}$
- $(111)_{C1} = (-0)_{10}$
- $(110)_{C1} = (-1)_{10}$
- $(101)_{C1} = (-2)_{10}$
- $(100)_{C1} = (-3)_{10}$

Gracias al ejemplo anterior, se pueden intuir dos propiedades de esta codificación. Primero que el cero tiene dos representaciones (la positiva y la negativa) y segundo que, al igual que en la codificación en signo magnitud, el rango es simétrico. Es más, como se utiliza un número igual de bits para la codificar el módulo, el rango de las representaciones en complemento a 1 es igual al rango de las representaciones en signo-magnitud.

EJEMPLO 3.10

Los ejemplos que se muestran a continuación explican cómo convertir números en base 10 a números en complemento a 1 con 8 bits y reservando 2 bits para la parte decimal y viceversa:

- $(15,5)_{10}$. Primero se convierte a binario puro $(1111,1)_2$. Después se completa con 0 hasta alcanzar los 6 bits de la parte entera y los 2 bits de la decimal: $(001111,10)_2$. Como el número es positivo, no se necesita realizar ninguna otra operación: $(001111,10)_{c1}$.
- $(-15,5)_{10}$. Primero se convierte a binario puro $(1111,1)_2$. Después se completa con 0 hasta alcanzar los 6 bits de la parte entera y los 2 bits de la decimal: $(001111,10)_2$. Como el número es negativo se obtiene su complemento a la base restringido: $(110000,01)_{c1}$.
- $(32)_{10}$. Primero se convierte a binario puro $(100000)_2$. Después se completa con 0 hasta alcanzar los 2 bits de la decimal: $(100000,00)_2$. El número es positivo y el bit de signo indica que es negativo. Esto es debido a que el número que se desea representar no está dentro del rango de la codificación. Para poder codificar 32 en complemento a 1 habría que utilizar al menos 7 bits para la parte entera.
- $(000010,00)_{c1}$. El bit más significativo indica que se trata de un número positivo y por este motivo se convierte a base 10 de forma directa: $(2)_{10}$.
- $(111111,01)_{c1}$. El bit más significativo indica que se trata de un número negativo. Para obtener su módulo se calcula su complemento a la base restringido: $(000000,10)_{c1}$. El módulo obtenido se convierte a base 10 y se multiplica por -1: $(-0,5)_{10}$.

ACTIVIDADES 3.5

- Montar un circuito que obtenga el complementario de un número de 4 bits en complemento a 1. Diséñalo inicialmente en papel y, posteriormente, con la ayuda del profesor, impleméntalo en una placa de inserción.

3.2.3.4 Complemento a 2

Al igual que la codificación en complemento a 1 se basaba en la operación de complemento a la base restringido, para describir la codificación en **complemento a 2** es necesario definir la operación de complemento a la base. Dado un número X expresado en base r con p bits para la parte entera, se define la operación de complemento a la base de X ($C_r(X)$) como la diferencia entre la base r elevada a p menos X ($C_r(X) = r^p - X$).

EJEMPLO 3.11

Volviendo al ejemplo del subapartado anterior, si se codifican números enteros con 4 bits, su complemento a la base o complemento a 2 (por estar utilizando la base 2) será:

- $C_2(0000) = 2^4 - 0 = 16 = (10000)_2$, solo se dispone de 4 bits => $(0000)_2$
- $C_2(1111) = 2^4 - 15 = 1 = (0001)_2$
- $C_2(0001) = 2^4 - 1 = 15 = (1111)_2$

Al igual que sucedía con el complemento a 1, el complemento a 2 del complemento a 2 de un número es el mismo número: $C_2(C_2(X)) = X$. Observando la fórmula del complemento a 2 puede concluirse que el complemento a 2 de un número es igual al complemento a 1 más el valor del bit menos significativo: $C_2(X) = C_1(X) + 2^{-q}$. De esta forma, el complemento a 2 de un número puede calcularse de forma sencilla sumándole el valor del bit menos significativo a su complemento a 1. Se sustituyen los unos por ceros y los ceros por unos y se suma el valor del dígito menos significativo al resultado utilizando las reglas de la aritmética binaria. Para el caso de los números enteros, el complemento a 2 de un número se calcula a partir del complemento a 1 del mismo sumándole 1: $C_2(X) = C_1(X) + 1$.

La operación de complemento a la base se utiliza para codificar números enteros en binario de la siguiente forma: los números positivos se representan en binario puro y su bit más significativo debe ser siempre 0, los números negativos se representan como el complemento a 2 de los números positivos y su bit más significativo es siempre 1.

EJEMPLO 3.12

De esta forma con tres bits se pueden representar los siguientes números enteros en complemento a 2:

- $(011)_{C1} = (3)_{10}$
- $(010)_{C1} = (2)_{10}$
- $(001)_{C1} = (1)_{10}$
- $(000)_{C1} = (0)_{10}$
- $(111)_{C1} = (-1)_{10}$
- $(110)_{C1} = (-2)_{10}$
- $(101)_{C1} = (-3)_{10}$
- $(100)_{C1} = (-4)_{10}$

Las codificaciones en complemento a 2 se diferencian de las codificaciones en complemento a 1 y en signo-magnitud principalmente en dos aspectos. Primero, carecen de ambigüedades. El cero se codifica de una única forma. Segundo, su rango no es simétrico, puede codificar un número negativo más: $[-2^{p-1}, 2^{p-1}-2^{-q}]$. Si se desea representar números enteros, el rango de la representación es $[-2^{n-1}, 2^{n-1}-1]$. Como el lector puede imaginarse, los números positivos tienen la misma codificación en binario puro, signo-magnitud, complemento a 1 y complemento a 2, diferenciándose en la representación de los números negativos.

EJEMPLO 3.13

A continuación, se muestran ejemplos que detallan como convertir números en base 10 a números en complemento a 2 con 8 bits y reservando 2 bits para la parte decimal y viceversa:

- $(15,5)_{10}$. Primero se convierte a binario puro $(1111,1)_2$. Después se completa con ceros hasta alcanzar los 6 bits de la parte entera y los 2 bits de la decimal: $(001111,10)_2$. Como el número es positivo no se necesita realizar ninguna otra operación: $(001111,10)_{c2}$.
- $(-15,5)_{10}$. Primero se convierte a binario puro $(1111,1)_2$. Después se completa con ceros hasta alcanzar los 6 bits de la parte entera y los 2 bits de la decimal: $(001111,10)_2$. Como el número es negativo se obtiene su complemento a la base: $(110000,10)_{c1}$.
- $(32)_{10}$. Primero se convierte a binario puro $(100000)_2$. Después se completa con ceros hasta alcanzar los 2 bits de la decimal: $(100000,00)_2$. El número es positivo y el bit de signo indica que es negativo. Esto es debido a que el número que se desea representar no está dentro del rango de la codificación. Para poder codificar 32 en complemento a 2 habría que utilizar al menos 7 bits para la parte entera.
- $(000010,00)_{c1}$. El bit más significativo indica que se trata de un número positivo por este motivo se convierte a base 10 de forma directa: $(2)_{10}$.
- $(111111,01)_{c1}$. El bit más significativo indica que se trata de un número negativo. Para obtener su módulo se calcula su complemento a la base: $(000000,11)_{c1}$. El módulo obtenido se convierte a base 10 y se multiplica por -1: $(-0,75)_{10}$.

ACTIVIDADES 3.6

- Montar un circuito que sume y reste números de 4 bits en complemento a 2. Diséñalo inicialmente en papel y, posteriormente, con la ayuda del profesor, impleméntalo en una placa de inserción

3.2.3.5 Exceso a m

Las codificaciones en **exceso a M** son representaciones numéricas binarias donde para obtener el valor de una codificación es necesario restar un sesgo, vía o exceso M al valor del número en binario puro. De la mima forma para convertir un número cualquiera dentro del rango de representación a exceso a M se le deberá sumar dicho exceso M.

$$X = (-1 * x_{p-i})_i \sum_{i=-q}^{p-2} x * 2^i$$

Puede comprobarse que el menor valor representable será el exceso por -1 ($-M$) y el máximo entero representable será el máximo valor en representable en binario puro menos el exceso, quedando el rango definido por el siguiente intervalo: $[-M, 2^p - 2^{-q} - M]$. Si se desean representar números enteros, q es igual 0 y p es igual a n, quedando el rango definido como $[-M, 2^n - 1 - M]$. Este tipo de codificaciones se suelen usar casi exclusivamente para representar números enteros. Por este motivo. a partir de este momento el texto se referirá a este tipo de representaciones. El exceso se suele escoger de forma que el rango de números negativos representables sea similar al rango de los números positivos. El exceso que se suele utilizar de forma general es 2^{n-1}. De esta forma, habrá solamente un número negativo más quedando el rango definido por el intervalo: $[-2^{n-1}, 2^{n-1} - 1]$. Si el exceso escogido es $2^{n-1} - 1$, el rango de los números positivos tendrá un número más, siendo el nuevo rango de la codificación igual a: $[-(2^{n-1}-1), 2^{n-1}]$.

Al igual que la representación en complemento a 2, la codificación en exceso a M no tiene ambigüedades y su rango no es simétrico. Es más, si el exceso escogido es igual a 2^{n-1}, ambas codificaciones son equivalentes salvo por el bit de signo. En este caso, para convertir un número en complemento a 2 a exceso a 2^{n-1} y viceversa, solo sería necesario cambiar el bit más significativo.

EJEMPLO 3.14

A continuación se muestran ejemplos de cómo convertir números enteros en base 10 a números de 6 bits en exceso a 32 y viceversa:

- $(15)_{10}$. Primero se suma el exceso al número: 47. Después se convierte este número a binario puro: $(101111)_{E32}$.
- $(-15)_{10}$. Primero se suma el exceso al número: 17. Después se convierte este número a binario puro: $(010001)_{E32}$.
- $(0)_{10}$. Primero se suma el exceso al número: 32. Después se convierte este número a binario puro: $(100000)_{E32}$.
- $(011000)_{E32}$. Primero se convierte de binario puro a base 10: 24. Después se resta el exceso: $(-8)_{10}$.

3.2.4 CODIFICACIONES BCD

A pesar de que la muchos de los sistemas digitales, especialmente aquellos orientados a realizar operaciones complejas, utilizan sistemas en base 2 para codificar las cifras con las que se operará más adelante, también son de uso común las codificaciones binarias decimales o **BCD** (*Binary coded decimal*). Las codificaciones digitales se basan en representar cifras, codificando de forma separada cada uno de los dígitos que la componen. Por este motivo, su uso está especialmente indicado en sistemas donde es necesario mostrar un valor numérico.

¿SABÍAS QUE...?

Estas codificaciones normalmente son utilizadas cuando tiene que haber representación numérica, como en el caso de calculadoras, instrumental, ascensores, sistemas de control industrial, etc.

Las codificaciones BCD representan con cuatro bits los dígitos decimales del 0 al 9 y se combinan formando cifras. Los códigos BCD no son densos puesto que con 4 bits pueden representarse 16 símbolos. En ningún caso puede utilizarse un número de bits inferior a 4 para codificar los 10 dígitos decimales ($2^3 = 8$).

Las distintas codificaciones BCD se diferencian en los códigos que se utilizan para representar distintos dígitos. Los códigos BCD más utilizados son posicionales. Como el lector recordará, en los códigos posicionales el valor del bit viene determinado por su posición en la secuencia. Los distintos BCD posicionales se distinguen por el peso que da a cada uno de los 4 bits que componen el dígito. El código más utilizado es el BCD8421, este sistema multiplica el valor del bit más significativo por 8, el del siguiente por 4, el del siguiente por 2 y el del bit menos significativo por 1. Por ejemplo, el código 0101 representará el dígito 5 ($0 * 8 + 1 * 4 + 0 * 2 + 1 * 1 = 5$). El valor de los pesos en esta codificación coincide con el valor de los pesos en base 2, salvo que en el BCD8421 los números mayor a 9 ($(1001)_{BCD8421}$) no pertenecen a la codificación. Existen muchos otros códigos BCD posicionales como el 2 4 2 1 o el 8 4 -2 -1. En las codificaciones anteriores, la única restricción a la hora de seleccionar los pesos es que se puedan representar los 10 dígitos decimales con 4 bits.

Una de las codificaciones BCD más utilizadas es la codificación en exceso a 3. Esta codificación representa los 10 dígitos en exceso a tres. De esta forma, el dígito 4 se representa con el $(0111)_{BCD\text{-}3}$ ($4 + 3 = 7 = (0111)_2$). Una de las mayores ventajas de esta codificación es la facilidad con la que se pueden implementar las operaciones básicas de suma y resta. Por otro lado, es un código ortocomplementado si dos números x e y suman 9, se puede obtener x negando los bits de y. Por ejemplo, el complementario del 7 ($(1010)_{BCD\text{-}3}$) es el 2 ($(0101)_{BCD\text{-}3}$).

EJEMPLO 3.15

Para codificar una cifra en BCD se codifican sus dígitos de forma separada. Por ejemplo:

- La codificación del 15 en BCD-3 es 01001000.
- La codificación del 127 en BCD8421 es 000100100111.
- La codificación del 345 en BCD2421 es 001101001011.

ACTIVIDADES 3.7

- Busca diferentes simuladores de circuitos digitales por Internet (MULTISIM, ELECTRONICS WORKBENCH, etc.).
- Utiliza un software para la simulación de circuitos digitales para analizar el funcionamiento del decodificador BCD a decimal 7442. Dibuja la tabla de verdad para ver su funcionamiento.

3.2.5 CÓDIGOS CONTINUOS

En apartados anteriores se han detallado distintos sistemas de codificación, algunos basados en el sistema en base 2 (por ejemplo, el binario puro) y otros no (por ejemplo, el BCD2421). Todos ellos son posicionales. Es decir, el valor de un bit viene determinado por su posición en la cadena. Este apartado se va a centrar en unos **códigos continuos**. Las codificaciones continuas no son posicionales y su característica principal es que los códigos de dos números consecutivos difieren exclusivamente en un solo bit, es decir, son códigos adyacentes.

Este tipo de codificaciones son útiles en sistemas en los que la aparición de valores incorrectos en la transición entre dos códigos puede suponer un problema. Por ejemplo, se dispone de un *encoder* o codificador que devuelve la posición de un brazo mecánico. Dicho brazo se puede desplazar de una posición a otra consecutiva, es decir, de la posición 3 puede pasar a la posición 2 o a la posición 4. Si las distintas codificaciones se realizan en binario puro cuando el brazo pasa de la posición 011 (posición 3) a la posición 100 (posición 4), es necesario cambiar 3 bits. En esta transición puede que determinados bits cambien su valor más rápidamente, codificándose momentáneamente valores incorrectos. Si los dos primeros bits cambian de valor antes que el tercero, momentáneamente se codificará la posición 000 (posición 0). Estos momentáneos valores incorrectos pueden suponer un problema en determinados sistemas. Los códigos continuos pueden solucionar este problema. Los dos principales códigos continuos son el código de Gray y el de Johnson.

3.3 SISTEMAS DE REPRESENTACIÓN ALFANUMÉRICA

Las **codificaciones alfanuméricas** son las encargadas de representar los caracteres alfabéticos, numéricos, signos de puntuación y signos de control mediante cadenas de bits. En el abecedario latino debe representarse al menos 26 letras (en castellano 27, puesto que se debe añadir la *ñ*) y 10 dígitos, es decir, 36 caracteres, luego necesitan un mínimo de 6 bits ($64 = 2^6$). En realidad, entre signos de puntuación, signos de control, otros símbolos y si se distingue entre mayúsculas y minúsculas, se necesitan más de 64 caracteres, por este motivo las codificaciones más utilizadas emplean más de 7 bits.

El código alfanumérico más utilizado en la actualidad es el **ASCII** (*American Standard Code for Information Interchange*) a pesar de su limitaciones y de la aparición de posibles sustitutos como el *Unicode*. El código ASCII fue creado por el Instituto Estadounidense de Estándares Nacionales. Está basado en el alfabeto latino y utilizaba 7 bits para representar 128 caracteres. En este código, los primeros 32 caracteres codificaban símbolos no imprimibles, en su mayoría símbolos de control, siendo los restantes símbolos gráficos o imprimibles. Por ejemplo, del 48 al 57 se codifican

los 10 dígitos decimales (los cuatro bits menos significativos codifican el dígito en BCD) y del 66 al 90 se codifican las 26 letras del abecedario latino.

En lugar del código ASCII original se utiliza el código ASCII extendido. Es un código de 8 bits que aumenta su capacidad con 128 caracteres adicionales. Estos caracteres incluyen caracteres alfabéticos no ingleses, símbolos no ingleses, letras griegas, símbolos matemáticos, caracteres para gráficos, caracteres gráficos de barra y caracteres sombreados. Los códigos ASCII extendidos se utilizan para incluir variaciones nacionales. El código más usado en nuestra zona geográfica es el *Latin-1* y permite incluir caracteres como la *ñ*.

¿SABÍAS QUE...?

En los ordenadores personales es muy útil disponer de una tabla con los códigos ASCII correspondientes, por si el teclado no está bien configurado para nuestro idioma, y algún símbolo especial no se muestra correctamente. En ese caso, se accede al código ASCII pulsando la tecla [**Alt**] del teclado más el número del símbolo que queramos mostrar (utilizando el teclado numérico.

El código **Unicode** emplea un número entero por carácter, y tiene bastantes posibilidades de convertirse en el código estándar internacional en algunos años. Dependiendo de la arquitectura del computador, un entero puede definirse con 8, 16 ó 32 bits. *Unicode* establece como combinar los números enteros para formar símbolos del lenguaje. Los códigos de 8 y 16 bits son de longitud variable, mientras que el código de 32 es de longitud fija. La gran ventaja de *Unicode* frente al código ASCII es que no requiere variaciones nacionales.

ACTIVIDADES 3.8

- Busca cuál es el código ASCII de los siguientes caracteres: *A*, ~, *ñ*, *€* y *Z*.
- Buscar información sobre otros sistemas de codificación en el apéndice.

RESUMEN DEL CAPÍTULO

Este capítulo se centra en describir conceptos básicos relacionados con la codificación de la información. Se han descrito los sistemas de codificación de la información numérica puesto que la mayoría de la información procesada por los sistemas digitales es de esta naturaleza.

La mayoría de las codificaciones numéricas binarias se basan el sistema de numeración en base 2. Los sistemas en base 2 permiten codificar información numérica utilizando dos dígitos. En los primeros apartados se ha detallado como pasar números representados en una determinada base a otra base cualquiera. Los sistemas numéricos en base 2 se caracterizan por representar un rango de valores con una determinada precisión y resolución y con un determinado número de bits. Dependiendo de la naturaleza de la información numérica que se desee codificar se optará por un sistema de codificación u otro. Los sistemas en coma fija se utilizan tradicionalmente para codificar números enteros, mientras que los números en coma flotante suelen utilizarse para codificar números reales.

Existen codificaciones que no están basadas en el sistema en base 2. Entre ellas destacan los códigos BCD que codifican los 10 dígitos del sistema en base 10 con 4 bits. Los códigos BCD se diferencian en las secuencias de bits escogidas para representar los dígitos del 0 al 9.

La selección de una determinada codificación no solo depende de la naturaleza de la información, sino del uso que vaya hacerse de la misma. En determinados sistemas los datos pueden alterarse de forma errónea, por ejemplo al trasmitir un conjunto de datos a través de un medio con mucho ruido, la información original puede dañarse. Existen codificaciones que permiten detectar estas situaciones y en algunos casos corregirlas.

EJERCICIOS PROPUESTOS

- **1.** Pasar las siguientes representaciones numéricas a base 10:
  - $(10110)_2$.
  - $(A81)_{16}$.
  - $(33,12)_4$.
- **2.** Pasar las siguientes representaciones numéricas a base 5:
  - $(1571)_{10}$.
  - $(81)_{10}$.
  - $(17,56)_{10}$.

- **3.** Pasar las siguientes representaciones numéricas a base 3:
  - $(1011,10)_2$.
  - $(81)_{16}$.
  - $(12,1)_4$.
- **4.** Pasar las siguientes representaciones numéricas a base 2:
  - $(21)_8$.
  - $(21)_{16}$.
  - $(15,7)_8$.
  - $(AF,D)_{16}$.
  - $(15,7)_{10}$.
- **5**. Pasar las siguientes representaciones numéricas en base 2 a base 8:
  - 101.
  - 100011.
  - 10110.
  - 111,001.
  - 10,10.
- **6.** Pasar las siguientes representaciones numéricas en base 2 a base 16.
  - 1010.
  - 10010011.
  - 10110.
  - 1111,0001.
  - 10,10.
- **7.** Indicar el rango, la resolución y el error absoluto máximo al representar números reales (suponiendo redondeo al más próximo) de las siguientes codificaciones:
  - Números en binario puro codificados con un total de 7 bits de los cuales 2 se reservan para la parte fraccionaria.
  - Números de 4 bits en exceso a 8.
  - Números de 5 bits en complemento a 1.
  - Números de 5 bits en complemento a 2.
  - Números de 8 bits en signo-magnitud.
- **8.** Datos dos números $A = (2,7)_{10}$ y $B = (0,2)_{10}$. Se pide lo siguiente:
  - Convertir A y B a binario con 8 cifras fraccionarias.
  - Convertir el número obtenido en el apartado anterior a base 10.
- **9.** Obtener el valor en base 10 de las secuencias de bits que se muestran a continuación suponiendo que están codificados en binario puro, complemento a 1, complemento a 2, signo magnitud, exceso a 128 y exceso a 127:
  - 10000000.
  - 00000000.
  - 01110111.
  - 10010111.
  - 11111111.
- **10.** Representar los siguientes valores expresados en base 10 en binario puro, complemento a 1, complemento a 2, signo magnitud, exceso a 128 y exceso a 127, utilizando 8 bits (siempre y cuando sea posible):
  - 0.
  - 71.
  - -71.
  - -25.
  - -128.
  - 128.
- **11.** Codificar los siguientes números expresados en base 10 en BCD8421:
  - 10.
  - 290.
  - 15.

TEST DE CONOCIMIENTOS

NOTA. Para la realización de este test de conocimientos se requiere información contenida en el capítulo 10.

1 Indicar cuáles de las siguientes codificaciones son cíclicas:
- a) Los códigos de Johnson.
- b) El binario puro.
- c) El código reflejo.
- d) El código ASCII.

2 Indicar cuáles de los siguientes códigos son ponderados:
- a) El código ASCII.
- b) El binario puro.
- c) El código reflejo o código de Gray.
- d) El código BCD8421.

3 Indicar cuáles de los siguientes códigos son continuos:
- a) El código ASCII.
- b) El binario puro.
- c) El código reflejo.
- d) El complemento a 2.

4 Indicar cuáles de las siguientes afirmaciones son ciertas:
- a) El rango de una codificación depende exclusivamente del número de bits empleado.
- b) El rango de una codificación depende tanto de la codificación utilizada como del número de bits empleado.
- c) El rango de una codificación depende exclusivamente del tipo de codificación utilizada.
- d) Ninguna de las anteriores es cierta.

5 Indicar cuáles de las siguientes afirmaciones son ciertas:
- a) El error cometido al representar un número real en coma fija depende del número total de bits utilizados.
- b) El error cometido al representar un número real en coma fija depende del número de bits utilizados en la parte fraccionaria.
- c) El error cometido al representar un número real en coma fija depende del redondeo utilizado.
- d) El error absoluto es constante en todo el rango de representación.

6 Indicar cuáles de las siguientes representaciones tiene una doble representación del 0:
- a) Los números representados en exceso.
- b) Las representaciones en complemento a 1.
- c) Las representaciones en complemento a 2.
- d) Las representaciones en signo-magnitud.

7 Indicar cuáles de las siguientes representaciones codifican los números negativos poniendo a uno su bit más significativo:
- a) Los números representados en exceso.
- b) Las representaciones en binario puro.
- c) Las representaciones en complemento a 2.
- d) Las representaciones en signo-magnitud.

8 Indicar cuáles de las siguientes afirmaciones son ciertas:
- a) Los códigos de Huffman utilizan palabras de tamaño variable.
- b) Los códigos de Huffman añaden información redundante para la detección y corrección de errores.
- c) Los códigos de Hamming utilizan palabras de tamaño variable.
- d) Los códigos de Hamming añaden información redundante para la detección y corrección de errores.

4 Componentes electrónicos básicos

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- ✓ Comprender la diferencia entre componentes pasivos y activos.
- ✓ Aprender el comportamiento básico de los componentes pasivos (resistencias, condensadores y bobinas).
- ✓ Analizar circuitos sencillos con componentes pasivos.
- ✓ Mostrar la teoría de base de semiconductores.
- ✓ Comprender el funcionamiento de los diodos.

En los capítulos anteriores se han expuesto los principales conceptos y los elementos básicos que se pueden encontrar en sistemas electrónicos digitales. En este y en los sucesivos capítulos se mostrarán los componentes que se encuentran en los circuitos de electrónica analógica. Más concretamente, en este capítulo se enumeraran los dispositivos electrónicos más simples separándolos en componentes pasivos y componentes activos.

Un **componente electrónico** es un dispositivo que forma parte de un circuito electrónico. Estos componentes tienen dos o más patillas (o terminales) y pueden conectarse entre si de diversas formas aunque lo más habitual es encontrarlos soldados a circuitos impresos.

Los componentes electrónicos se pueden clasificar atendiendo a diferentes características. Una de las más importantes es la función que desempeñan, haciéndose así una división en dos grandes grupos:

- **Componentes activos**: son los componentes que introducen excitación eléctrica en el circuito, producen amplificación o realizan algún tipo de control de la corriente.
- **Componentes pasivos**: son los componentes que sirven para interconectar los componentes activos asegurando la correcta transmisión de las señales.

4.1 COMPONENTES PASIVOS

Los **componentes pasivos**, como se ha dicho previamente, son aquellos que no necesitan una fuente de energía para su funcionamiento. De esta forma, estos dispositivos no pueden controlar ni amplificar la corriente de un circuito tal y como sí pueden hacer los componentes activos.

Los tres tipos de componentes pasivos son:

- **Resistencias**: presentan una oposición al paso de corriente.
- **Condensadores**: almacenan energía eléctrica.
- **Bobinas**: almacenan energía en forma de campo magnético.

En los siguientes apartados se detallarán las características de los tres tipos de componentes enumerados anteriormente.

4.1.1 RESISTENCIAS

Una **resistencia** o **resistor** es un componente electrónico con dos terminales que realiza una oposición al flujo de corriente eléctrica. Esto es equivalente a decir que este componente introduce una resistencia eléctrica, la cual se mide en Ohmios (Ω) y depende del material con el que se fabrique el componente. La resistencia se define como la ratio entre tensión y corriente según la **ley de Ohm**:

$$R = \frac{V}{I} \Rightarrow I = \frac{V}{R} \qquad \text{(Ec. 4.1)}$$

Por lo tanto, a mayor resistencia y misma tensión la cantidad de corriente será menor realizando así la resistencia al paso de corriente previamente mencionado.

¿SABÍAS QUE...?

El organismo internacional que define los valores normalizadores de resistores comerciales es el *Comité Electrotécnico Internacional* (CEI).

Las resistencias se pueden construir de muy diversas maneras, con diversos materiales resistivos y de diferentes tamaños y formas. Una primera clasificación general que se puede realizar es separar las resistencias cuyo valor de resistencia es constante, de las resistencias cuyo valor puede variar dependiendo de algún factor.

¿SABÍAS QUE...?

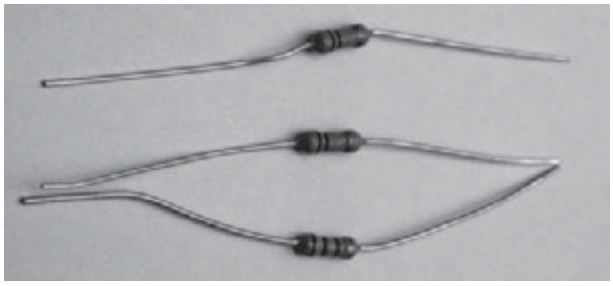
En inglés se dice:
- Resistencia. *Resistance*.
- Resistor: *resistor*.
- Amperio *ampere*.
- Vatio: *watt*.
- Voltio: *voltaje*.
- Serie: *serial*.
- Paralelo: *parallel*.

4.1.1.1 Resistencias fijas

Las **resistencias fijas** son aquellas cuyo valor de resistencia siempre es el mismo. Este tipo de resistencias se representan mediante uno de los dos símbolos de la Figura 4.1.

Figura 4.1. *Símbolos de resistencias fija*

La siguiente imagen muestra un conjunto de resistencias fijas.



Resistencias

Tipos de fabricación

Se suelen construir usando dos tipos de materiales principalmente: carbón y níquel. Dentro de las de carbón se pueden separar a su vez en dos grupos, pero por claridad se hablará de tres tipos de fabricación:

- **Resistencias de carbón aglomeradas**: están formadas por una masa de carbón que actúa como elemento resistivo. Esta masa es compactada y prensada mezclada con algún otro elemento que sirva para mejorar este proceso de prensado. A esta masa se le proporciona una forma cilíndrica y se insertan los dos terminales en los extremos del conjunto. Por último, se recubre el conjunto con una resina que lo aísle y que sirva para disipar el calor que se genera en la resistencia. Este tipo de resistencias son bastante sensibles a la temperatura y al paso del tiempo, siendo habitual que el valor de la resistencia pueda variar en un 10% con respecto al deseado. A esta variación se le denomina **tolerancia**. Así mismo, introducen gran cantidad de ruido térmico por lo que no son adecuadas para determinadas aplicaciones.

Recuerda que la tolerancia de una resistencia es la variación, producida por el proceso de fabricación, de su valor nominal.

- **Resistencias de película de carbón**: se parte de un tubo de material aislante, generalmente un material cerámico, y se recubre con una fina película de carbón. Existe una variación de este tipo de resistencias en el que se usa una película de alguna aleación metálica o un óxido en vez de carbón, que tenga una alta constante resistiva. Al igual que las aglomeradas, las resistencias de película se recubren con una resina aislante. Las resistencias de película son las más empleadas hoy en día y dentro de este tipo las de película metálica son las de mayor fabricación. Este tipo de resistencias se suele emplear cuando la potencia disipada es menor a 2 W. La tolerancia ronda el 5% para las de película de carbón y el 1% para las de película metálica.
- **Resistencias en bobina**: este tipo de resistencia fue de los primeros en fabricarse y hoy en día siguen usándose cuando la potencia disipada alcanza valores elevados. Su construcción se basa en un hilo conductor bobinado en espiral sobre algún tipo de sustrato cerámico. Estas resistencias presentan una tolerancia elevada, generalmente no inferior a 10%, pero por el contrario pueden soportar altas temperaturas.

Asociación de resistencias

Las resistencias se pueden asociar en serie o en paralelo tal y como muestra la Figura 4.2. En el caso serie la resistencia total será la suma de las resistencias parciales:

$$R_T = R_1 + R_2 + \ldots + R_N \qquad \text{(Ec. 4.2)}$$

Mientras que si se asocian en paralelo la resistencia total será la inversa de la suma de las inversas:

$$R_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_N}\right)} \qquad \text{(Ec. 4.3)}$$

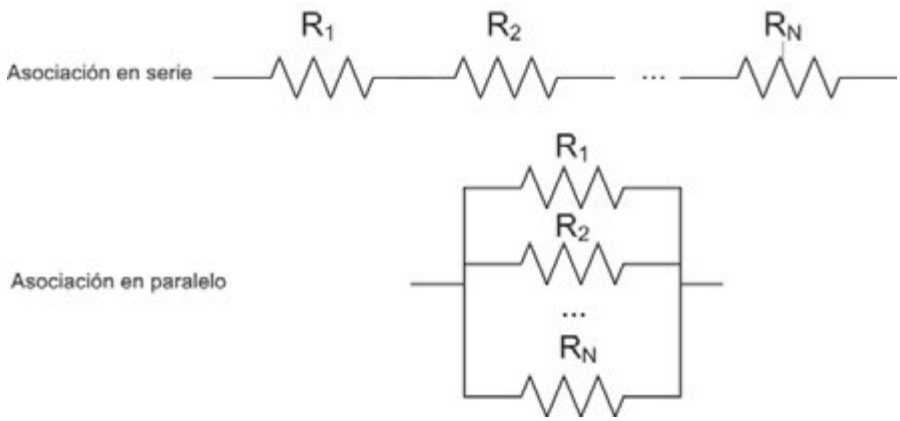


Figura 4.2. *Asociación de resistencias*

ACTIVIDADES 4.1

- Medir con un multímetro la resistencia total en asociaciones en serie y en paralelo.

Código de colores

Las resistencias de valor fijo son los componentes que más aparecen en los circuitos. Una manera de reconocerlas es por su forma, que generalmente es parecida a un cilindro y coloreada con unos círculos de distintos colores. Estos colores sirven para identificar las características de la resistencia. Los dos parámetros principales que se codifican usando estas bandas de colores son el valor de la resistencia y la tolerancia de la misma. Generalmente, el valor de la resistencia no es exactamente el que se indica. Esta variación puede depender de diversos factores como la temperatura o el tipo de fabricación de la resistencia. A la posible variación del valor de la resistencia real con respecto al esperado se le denomina **tolerancia**.

El **código de colores** de una resistencia está formado por varias bandas de las cuales la más cercana al extremo de la derecha indica la tolerancia. El resto sirven para conocer el valor en Ohmios y puede constar de 3 o más bandas, siendo la de más a la derecha (la más próxima a la banda de la tolerancia) la que se usa como multiplicador del valor y las siguientes de derecha a izquierda codifican el valor de los dígitos de menor a mayor peso. La siguiente tabla codifica los valores para los distintos colores:

Colores	1er dígito	2º dígito	Multiplicador	Tolerancia
Negro		0	0	
Marrón	1	1	10^1	± 1%
Rojo	2	2	10^2	± 2%
Naranja	3	3	10^3	
Amarillo	4	4	10^4	
Verde	5	5	10^5	± 0.5%
Azul	6	6	10^6	
Violeta	7	7	10^7	
Gris	8	8	10^8	
Blanco	9	9	10^9	
Dorado			10^{-1}	± 5%
Plata			10^{-2}	± 10%
Sin color				± 20%

De esta forma, por ejemplo, una resistencia formada por (Naranja, Negro, Rojo, Dorado) se analizaría de la siguiente manera. La banda de la derecha, de color Dorado, indica que la resistencia tiene una tolerancia del 5%. La siguiente banda desde la derecha indica que el multiplicador es 10^2 (color Rojo). Las otras dos bandas sirven para indicar la primera y la segunda cifra siendo en este caso 3 (Naranja) y 0 (Negro), leyendo de izquierda a derecha. Por tanto el valor de la resistencia es $30 \cdot 10^2 = 3000\ \Omega$ o lo que es lo mismo 3 KΩ.

También existen resistencias que en vez de tener 4 bandas de color presentan 5. La única diferencia es que se añade una tercera cifra que se codifica con la banda que está en medio. Por ejemplo una resistencia formada por (Verde, Amarillo, Negro, Rojo, Marrón) sería $540 \cdot 10^2 = 54.000\ \Omega = 54K\ \Omega$.

4.1.1.2 Resistencias variables

Las **resistencias variables** a diferencia de las anteriores, permiten ajustar, dentro de unos límites, el valor de la resistencia en un momento determinado. Para ello, cuentan con un tercer terminal que es móvil y que se desplaza a lo largo del elemento resistivo de forma que cambia el valor de la resistencia según la posición en la que se encuentre. La Figura 4.3 muestra los símbolos que se suelen usar para representar resistencias variables.

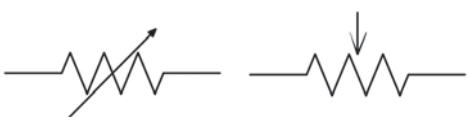


Figura 4.3. *Símbolo de resistencias variables*

Generalmente, se suele hablar de dos tipos de resistencias variables: potenciómetros y reóstatos. Una de las diferencias principales es la forma en la que se conectan en un circuito. Los potenciómetros se conectan de forma paralela, es decir, se usan los tres terminales y actúan como un divisor continuo de voltaje. Para poder mover el terminal variable se suele utilizar algún tipo de mecanismo giratorio como puede ser la rueda que se acciona en un aparato de radio para subir y bajar el volumen. La Figura 4.4 muestra un ejemplo de potenciómetro.

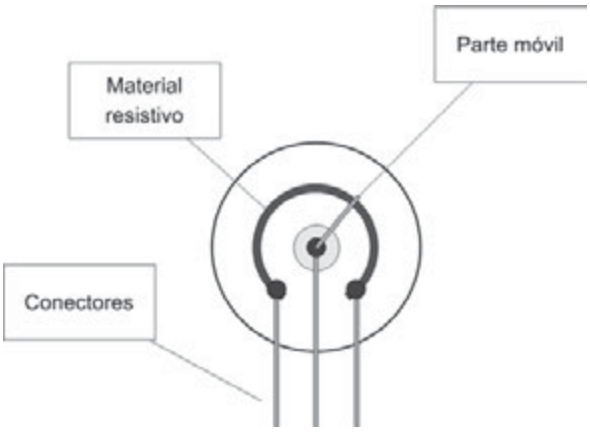


Figura 4.4. *Potenciómetro*

Por otro lado, los reóstatos se conectan de forma serie dejando un terminal al aire. Esto hace que los reóstatos sirvan para controlar intensidad. Este tipo de resistencias variables están construidas para soportan niveles de tensión y corriente elevados y mucho mayores que los que soportan los potenciómetros.

La Figura 4.5 muestra la diferencia de conexión entre un potenciómetro y un reóstato.

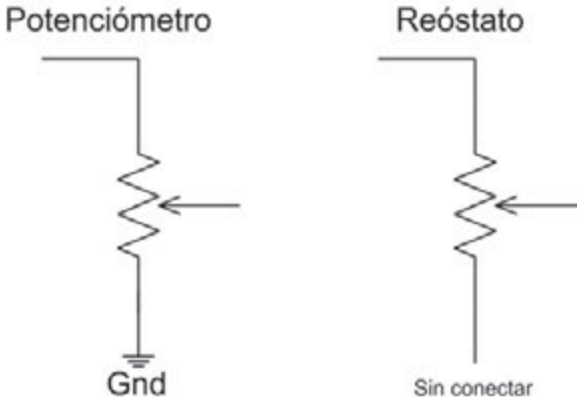


Figura 4.5. *Conexión de potenciómetros y reóstatos*

Además de las anteriores, existen otros tipos de resistencias variables cuyo valor se ve modificado por otros factores, como puede ser la intensidad lumínica (fotorresistor) o la temperatura (termistor).

ACTIVIDADES 4.2

- Resume en una tabla todos los tipos de resistencia explicados en el capítulo.
- Ayudándose de la tabla de códigos de colores de las resistencias, indica la tolerancia de las resistencias con código rojo y verde.

4.1.2 CONDENSADORES

Los **condensadores** (o **capacitores**) son dispositivos que permiten almacenar energía eléctrica. Están formados por dos conductores próximos y que se encuentran separados por algún material dieléctrico (materiales aislantes) y por tanto, constan de dos terminales. Por ejemplo, la fabricación más sencilla de un condensador consiste en usar dos placas metálicas colocadas de forma paralela y separadas por una lámina de material no conductor. Al aplicar una carga Q en una las placas esta es capaz de inducir una carga de la misma magnitud pero de signo contrario (-*Q*) en la otra placa. En este caso se dice que el condensador está cargado con una carga *Q*.

Hay que tener en cuenta así mismo que, cuando se aplica una tensión continua en las placas de un condensador, no habrá circulación de corriente debido al material dieléctrico que hace la función de aislante eléctrico pero se producirá una acumulación de carga polarizándose así el condensador. Una vez polarizado, si se retira la tensión aplicada el condensador permanecerá cargado hasta que se cortocircuiten las placas y se produzca la corriente de descarga asociada.

La representación gráfica de un condensador en un circuito se muestra en la Figura 4.6. En la representación de la derecha se ha indicado que una de las placas tiene polarización positiva. Esto es importante porque dependiendo de la fabricación del componente, puede ser obligatorio respetar una determinada polarización ya que hay dispositivos que no soportan ser polarizados de forma contraria.

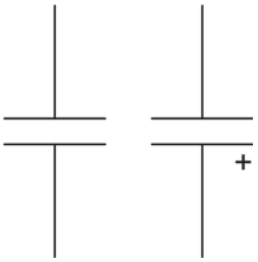


Figura 4.6. *Símbolo condensador*

4.1.2.1 Capacidad de un condensador

La **capacidad** de un condensador, que se mide en culombios por voltio, o lo que es lo mismo en faradios (F) y es la relación entre la carga almacenada (*Q*) y la diferencia de potencial o tensión entre sus dos terminales (V_{ab}). Los valores de capacidad suelen ser muy inferiores al faradio, por lo que se emplea generalmente el microfaradio (uF), el nanofaradio (nF) e incluso el picofaradio (pF)

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} \qquad \text{(Ec. 4.4)}$$

Las placas de un condensador podrían estar separadas por el vacío en vez de por un material dieléctrico. Sin embargo el dieléctrico proporciona algunas ventajas importantes:

- ✓ Resulta una manera sencilla de tener dos placas metálicas a una distancia muy pequeña sin que exista contacto físico entre las mismas.
- ✓ Permite emplear mayor potencial entre las placas sin que se produzca una ruptura dieléctrica debido a la generación de una chispa.
- ✓ La capacidad que se puede conseguir es notablemente superior.

La capacidad de un condensador se puede ver como la cantidad de energía eléctrica que es capaz de almacenar y depende de varios factores como son el material dieléctrico que se use y de la forma del propio condensador. Por ejemplo, si suponemos un condensador formado por dos placas planas rectangulares de igual forma y tamaño, la capacidad se rige por la siguiente expresión:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(\frac{S}{d} \right) \qquad \text{(Ec. 4.5)}$$

donde S es la superficie de las placas y d la distancia entre las mismas. El producto de $\varepsilon_0 \varepsilon_r$ representa la constante dieléctrica del material que generalmente se proporciona con respecto a la constante dieléctrica del vacío ($\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ *faradio/metro*).

4.1.2.2 Asociación de condensadores

Al igual que las resistencias, los condensadores se pueden asociar en serie y en paralelo, tal y como se muestra en la Figura 4.7. La capacidad equivalente en la conexión en serie será:

$$C_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_N} \right)} \qquad \text{(Ec. 4.6)}$$

Mientras que si asociamos los condensadores en paralelo se obtiene la siguiente capacidad total:

$$C_T = C_1 + C_2 + \ldots + C_N \qquad \text{(Ec. 4.7)}$$

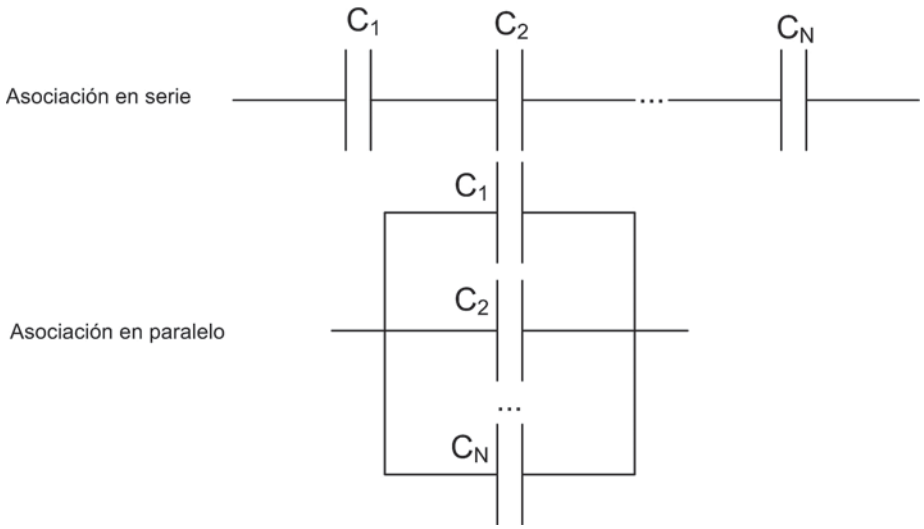


Figura 4.7. *Asociación de condensadores*

La expresión que relaciona la capacidad con la carga y la diferencia de potencial entre los terminales (Ecuación 4.4) no permite analizar cómo se comporta un condensador en un circuito ya que para ello se necesita una expresión que relacione la tensión con la intensidad y cómo varían estas dos magnitudes con el tiempo. Por tanto, para analizar estos dos factores se ha de derivar con respecto al tiempo dicha expresión (suponiendo la capacidad constante). Se obtiene la siguiente relación entre I y V:

$$I(t) = C\frac{dV}{dt} \qquad \text{(Ec. 4.8)}$$

Esta expresión supone que la corriente va desde la placa con carga negativa a la placa con carga positiva y si fuese en sentido contrario aparecería un signo negativo. Esta relación además implica que a una mayor corriente más rápidamente cambia el valor de tensión. Es decir, si vemos el condensador como un elemento que se va llenando, cargando en este caso, cuanto mayor sea la corriente más rápido se cargará.

ACTIVIDADES 4.3

- Demostrar la capacidad de los condensadores en serie y en paralelo.

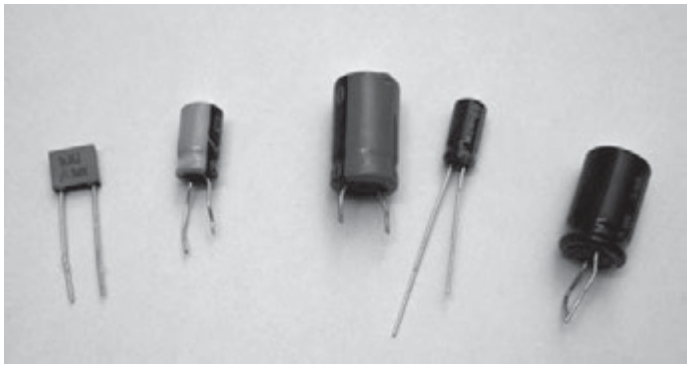
4.1.2.3 TIPOS DE CONDENSADORES

Los condensadores se pueden clasificar atendiendo a características de fabricación o funcionalidad. Por un lado podemos distinguir entre condensadores fijos, los cuales presentan un valor de capacidad constante, mientras que por otro lado, se pueden encontrar condensadores variables, los cuales permiten varían (dentro de unos márgenes) el valor de capacidad que presentan.

Dentro de los condensadores fijos se pueden distinguir los siguientes tipos principales:

- **Cerámicos**: se denominan así porque el material dieléctrico que se usa es de tipo cerámico. Este tipo de condensadores son especialmente económicos de fabricar pero por el contrario presentan una variabilidad elevada al paso del tiempo o a factores externos como la temperatura. Por otro lado, el tamaño de este tipo de condensadores es relativamente grande comparado con los valores de capacidad para los que se fabrica.
- **Película**: dentro de este grupo podemos encontrar diversos tipos dependiendo del material que se use en su fabricación. al contrario que los cerámicos, este tipo de condensadores presentan valores de capacidad que son muy estables tanto al paso del tiempo como a cambios de temperatura o humedad. Este tipo de condensadores presentan capacidades de aproximadamente entre soportan tensiones de hasta poco más de 2,500 V. Los más usados son los siguientes:
  - **Papel**: en este tipo de condensadores el dieléctrico está fabricado a partir de celulosa combinada con distintos tipos de resinas.
  - **Plástico**: también se conocen como condensadores MK y están fabricados con materiales como el poliéster o el polipropileno.
- **Electrolíticos**: este tipo de condensadores tienen la característica principal de este tipo de condensadores es su alta capacidad con respecto al tamaño que tienen debido a las buenas propiedades dieléctricas del producto químico que se usa como dieléctrico. Este tipo de condensadores son de tipo polarizado (ver apartado 4.1.2) y presentan una variabilidad elevada a factores externos como la temperatura o la humedad. La fabricación puede ser usando aluminio y ácido bórico (unas pocas centenas de faradios máximo y voltajes de alrededor de 500 V máximo) o tantalio en vez de aluminio. Estos últimos los que presentan una capacidad más estable.

La figura siguiente muestra algunos condensadores de los cuales los que tienen forma cilíndrica son electrolíticos mientras que el que tiene forma cuadrada es de tipo MK.



Condensadores

Por otro lado, se pueden fabricar condensadores variables, en los que un recubrimiento móvil que gira alrededor de un eje que hace que la distancia entre las placas sea mayor o menor variando así la capacidad del condensador.

¿SABÍAS QUE...?

Los condensadores también se identifican según las normas definidas por el CEI, aunque en muchas ocasiones son los propios fabricantes quienes definen los valores bajo sus criterios.

ACTIVIDADES 4.4

- Buscar en Internet la forma que pueden presentar los distintos condensadores.

4.1.2.4 Carga y descarga de un condensador

A continuación se va a analizar el proceso de carga y descarga de un condensador. Partimos de un circuito como el de la Figura 4.8 donde se tiene una fuente de tensión y un interruptor para habilitarla o para cortocircuitar las placas del condensador.

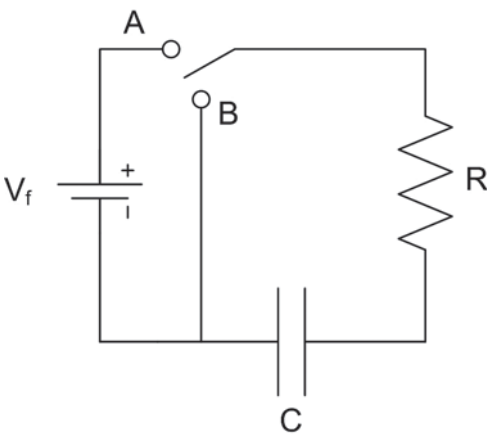


***Figura 4.8**. Circuito de carga de condensador*

Proceso de carga

Cuando el interruptor se conecta a *A* la tensión que se tiene por la ley de Ohm es de $I=V_f/R$ como si el condensador no estuviera presente ya que éste se encuentra descargado. Poco a poco el condensador empieza a cargarse y aumenta la tensión en sus bornes mientras que la intensidad empieza a disminuir hasta llegar a 0, cuando el condensador se

encuentra completamente cargado. La tensión máxima que puede alcanzar el condensador es la proporcionada por la fuente V_f. Para obtener las expresiones que representan este comportamiento partimos de la siguiente expresión, que se basa en que la caída de tensión total (en este caso la tensión de la fuente) es la suma de la tensión en la resistencia más la tensión en el condensador:

$$V_f = V_R + V_C = IR + \frac{q}{C} \qquad \text{(Ec. 4.9)}$$

A partir de ahí se ha aplicado la Ley de Ohm y la expresión de la capacidad (Ecuación 4.4). Cuando se cierra el interruptor la carga del condensador es 0.

Para obtener la variación de la intensidad en el tiempo se calcula la derivada con respecto al tiempo de la expresión anterior (Ecuación 4.9):

$$0 = \frac{dI}{dt}R + \frac{dQ}{dt}\frac{1}{C} \Rightarrow 0 = \frac{dI}{dt}R + I(t)\frac{1}{C} \qquad \text{(Ec. 4.10)}$$

Una vez se tiene esta ecuación diferencial que representa el proceso de carga de un condensador se puede resolver para obtener la intensidad. La solución a dicha ecuación diferencial pasa por conocer la intensidad máxima que será $I_{max} = V_f/R$, tal y como se expuso previamente, y resolver obteniendo:

$$I_c(t) = \mathrm{I}_{\max}\, e^{\frac{-t}{RC}} = \frac{V_f}{R} e^{\frac{-t}{RC}} \qquad \text{(Ec. 4.11)}$$

Si por otro lado se quiere obtener la expresión de la carga en un instante determinado se puede sustituir el valor de $I_c(t)$ obtenido en la expresión de partida

$$V_f = I(t)R + \frac{q(t)}{C} \Rightarrow q(t) = V_f C(1 - e^{\frac{-t}{RC}}) \qquad \text{(Ec. 4.12)}$$

Siendo $V_f C$ la carga máxima (Q_{max}) que admitirá el condensador.

Habitualmente, el producto RC se denomina τ y representa la constante de tiempo del circuito. En el instante $t = RC$ se tiene que la expresión $e^{-t/RC}$ vale e^{-1}, es decir, 0,4. De esta forma, obtenemos que $q = 0{,}6\ Q_{max}$, es decir, que en el instante τ el condensador se encuentra a un 60% de su carga máxima. A partir de la expresión de la carga se puede obtener directamente la tensión en el condensador:

$$q(t) = V_f C(1 - e^{\frac{-t}{RC}}) \Rightarrow V_c(t) = \frac{q(t)}{C} = V_f(1 - e^{\frac{-t}{RC}}) \qquad \text{(Ec. 4.13)}$$

Las graficas de la Figura 4.9 representan las curvas de carga para la intensidad y la tensión en el condensador.

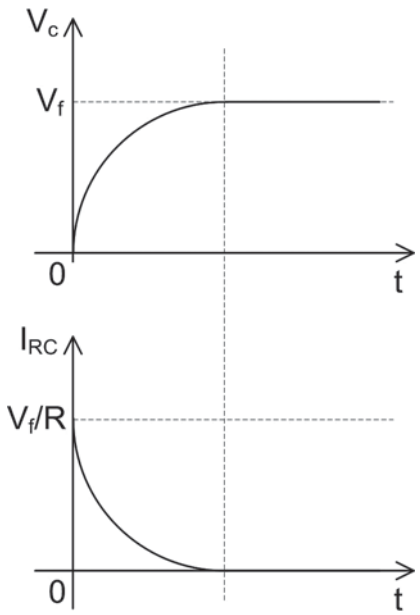


Figura 4.9. *Tensión e intensidad de carga en un circuito RC*

Proceso de descarga

Si ahora partiendo de que el condensado está cargado y tiene una diferencia de potencial V_0, si conmutamos el interruptor a la posición B (Figura 4.8) el condensador empezará a descargarse, estableciéndose una corriente en sentido horario cuyo valor inicial es V_0/R y que irá disminuyendo hasta llegar a ser nula.

Partiendo de que la tensión total es la suma de las tensiones en la resistencia (V_R) y en el condensador (V_C), y aplicando la Ley de Ohm y la ecuación de la capacidad de un condensador se tiene

$$V_{RC} = V_R + V_C \Rightarrow 0 = I(t)R - \frac{Q(t)}{C} \qquad \text{(Ec. 4.14)}$$

Además se cumple que cuando el condensador se está descargando la intensidad depende de la carga según la expresión:

$$I = -\frac{dQ}{dt} \qquad \text{(Ec. 4.15)}$$

donde el signo negativo en este caso se debe al sentido de la corriente de descarga.

Por tanto, introduciendo la Ecuación 4.15 en la expresión de la Ecuación 4.14 se tiene:

$$0 = -\frac{dQ}{dt}R - \frac{Q}{C} \Rightarrow \frac{dQ}{Q} = \frac{-1}{RC}dt \qquad \text{(Ec. 4.16)}$$

Si se resuelve esta ecuación diferencial se obtiene la expresión que relaciona la carga del condensador con el tiempo. Para ello hay que tener en cuenta que en el instante inicial ($t=0$) la carga máxima del condensador será Q_{max} y variará con respecto a t hasta alcanzar el valor $Q(t)$ en el instante t. La siguiente expresión es el resultado de esta resolución:

$$Q(t) = Q_{\max} e^{\frac{-t}{RC}} \qquad \text{(Ec. 4.17)}$$

Sustituyendo $Q(t)$ por $C \cdot V(t)$ y Q_{max} por $C \cdot V_0$, se obtiene la expresión para la tensión en el condensador dependiendo del instante de tiempo:

$$V(t) = V_0 e^{\frac{-t}{RC}} \qquad \text{(Ec. 4.18)}$$

Por último, si aplicamos en la expresión de $Q(t)$ (Ecuación 4.17) en la Ecuación 4.15 se puede obtener la expresión para $I(t)$:

$$I(t) = \mathrm{I}_{\max} e^{\frac{-t}{RC}} \qquad \text{(Ec. 4.19)}$$

con $I_{max} = -V_0/R$

A partir de las expresiones de $V(t)$ e $I(t)$ se pueden generar las gráficas para ambas variables cuando se descarga un condensador. La Figura 4.10 recoge ambas gráficas.

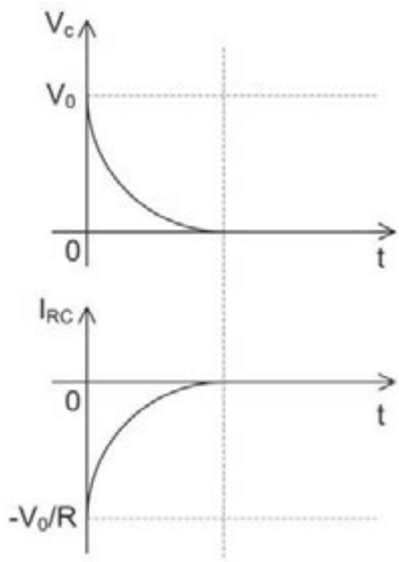


Figura 4.10. *Tensión e intensidad de descarga en un circuito RC*

¿SABÍAS QUE...?

En inglés, se dice:
- Condensador: *capacitor*.
- Faradio: *farad*.

4.1.3 BOBINAS

Las **bobinas** o **inductores**, son componentes pasivos que, tal y como ocurre con los condensadores, almacenan energía eléctrica pero en este caso lo hacen en forma de campo magnético.

El símbolo de una bobina en un circuito es el representado en la Figura 4.11. Además, pueden representarse dos líneas paralelas y longitudinales que representan que la bobina tiene núcleo ferromagnético.

Figura 4.11. *Símbolo de bobina*

4.1.3.1 Inductancia de una bobina

El principio básico en el que se basan las bobinas es en que un hilo por el que se transmite una corriente eléctrica genera a su paso un campo magnético alrededor del hilo y en el sentido que se determina con la regla de la mano derecha. Si la corriente que circula varía en el tiempo el campo magnético también sufrirá variación, lo que, según la ley de inducción magnética de Faraday, provoca una fuerza electromotriz o voltaje, que se opone a dicha variación, denominada fuerza electromotriz inducida. A este fenómeno se le conoce como **autoinducción**. Dicha fuerza electromotriz (ε) será proporcional a la variación de intensidad.

$$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt} \qquad \text{(Ec. 4.20)}$$

donde L es la constante de proporcionalidad y dependerá las características del circuito concreto.

Una bobina consiste en un hilo conductor arrollado sobre un núcleo que puede ser de aire o de un material ferromagnético, para aumentar la capacidad de generar campo magnético del conjunto. Estos hilos arrollados se conocen como espiras y hacen que, por el principio de autoinducción, se genere un campo magnético que circule desde el interior al exterior de la bobina. Dependiendo del número de espiras, la geometría de la bobina y los materiales usados está constante L será mayor o menor.

En una bobina, la constante L se denomina **inductancia** y se mide en henrios (H).

Si en la Ecuación 4.20 aplicamos la ley de Faraday, que relaciona la fuerza electromotriz con el flujo de campo magnético por unidad de tiempo (ε=-$d\varphi/dt$), se tiene:

$$\frac{d\Phi}{dt} = L\frac{dI}{dt} \Rightarrow d\Phi = LdI \qquad \text{(Ec. 4.21)}$$

Integrando esta expresión, teniendo en cuenta que cuando $I=0$ el flujo es nulo, se llega a obtener que la inductancia es la relación entre el flujo magnético y la intensidad de la corriente eléctrica:

$$L = \frac{\Phi}{I} \qquad \text{(Ec. 4.22)}$$

De esta expresión se deduce que un henrio será igual a un weber (medida del flujo) por un amperio (medida de intensidad).

Es importante tener en cuenta que el flujo magnético que aparece en la expresión anterior es el flujo magnético inducido por la corriente I únicamente.

¿SABÍAS QUE...?

En la vida real existen diversos componentes relacionados con los efectos de la autoinducción, como los altavoces, transformadores, micrófonos, etc.

¿SABÍAS QUE...?

En inglés, se dice:
- Bobina: *coil*.
- Inductancia: *inductance*.
- Relé: *relay*.
- Autoinducción: *self-induction*.
- Inducción magnética: *magnetic induction*.

4.1.3.2 Asociación de bobinas

Al igual que los condensadores y las resistencias, las bobinas pueden asociarse en serie y en paralelo para modificar su valor de inductancia, tal y como se muestra en la Figura 4.12. Para la asociación en serie la inductancia total será:

$$L_T = L_1 + L_2 + \ldots + L_N \qquad \text{(Ec. 4.23)}$$

Por otro lado, para asociación de bobinas en paralelo la inductancia total será:

$$L_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \ldots + \frac{1}{L_N}\right)} \qquad \text{(Ec. 4.24)}$$

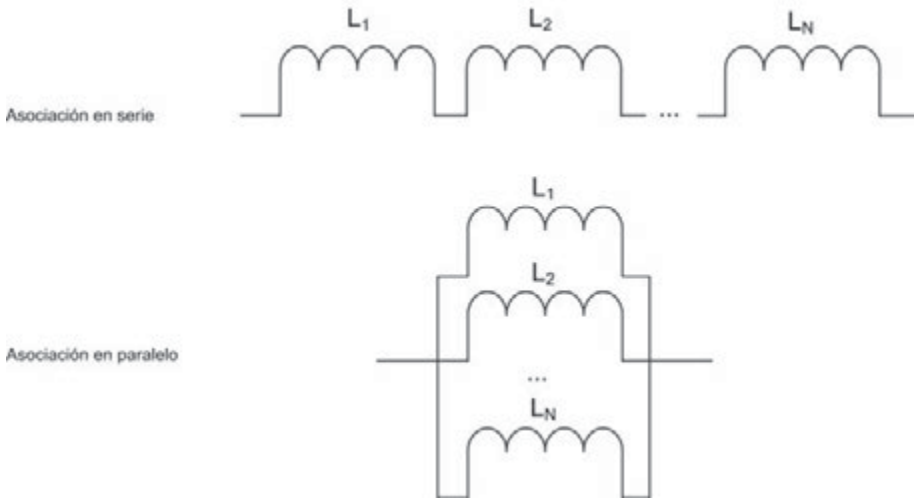


Figura 4.12. *Asociación de bobinas*

¿SABÍAS QUE...?

El **relé** es un dispositivo electromecánico que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.

ACTIVIDADES 4.5

- Demostrar la inductancia de las bobinas en serie y en paralelo.
- Las bobinas, según su aplicación, se pueden clasificar en:

  a. Bobinas de RF.
  b. Bobinas de sintonía.
  c. Bobinas de filtro.

  Busca información sobre cada uno de estos tipos.
- ¿Para qué sirve un relé?, ¿cuáles son sus aplicaciones más importantes?

4.2 COMPONENTES ACTIVOS

En los apartados anteriores se han expuesto los componentes pasivos más comunes. En este apartado se mostrará el otro conjunto de componentes, que se denominan componentes activos. La principal diferencia con los pasivos es que los activos son capaces de proporcionar ganancia y controlar de alguna manera la corriente en un circuito.

Los **componentes activos** más comunes son los semiconductores y las válvulas de vacío. Estás últimas representaron un gran avance en tecnologías como la televisión, la radio o el radar a principios del siglo XX. Sin embargo, hoy en día solo se usan en algunas aplicaciones muy determinadas, como la construcción de amplificadores para sonido, habiendo sido sustituidas por dispositivos semiconductores en la gran mayoría de los casos. En este apartado se describirán estos últimos y en particular se detallarán los diodos, dejando para capítulos posteriores otros dispositivos semiconductores, como son los transistores.

4.2.1 SEMICONDUCTORES

Los dispositivos **semiconductores** son componentes electrónicos que se aprovechan de las propiedades de los materiales semiconductores, como puede ser el silicio. La característica que hace tan importantes a los dispositivos semiconductores es la posibilidad de introducir de forma controlada impurezas que cambian sus propiedades de conductividad. Este proceso se denomina **dopado**.

4.2.1.1 Materiales Semiconductores

Un material sólido determinado puede ser conductor o aislante (dieléctrico) y esta propiedad depende en mayor medida de la red de enlaces que exista entre los átomos que lo forman. Por ejemplo, hay materiales como el carbono que dependiendo de su cristalización puede formar un material conductor (grafito) o un material casi completamente aislante (diamante).

Si a la hora de formar los enlaces entre los átomos estos tienen que perder algún electrón de valencia, estos electrones se quedan libres para saltar del núcleo de un átomo a otro. Esta propiedad que hace que los electrones se muevan es la que permite que se produzca conductividad en un material. Los materiales metálicos presentan estas características, lo que los convierte en buenos conductores. La Figura 4.13 representa está situación en la que los electrones de valencia se mueven libres entre los núcleos de los átomos, en este caso, cationes, ya que han perdido un electrón y por tanto tienen carga positiva.

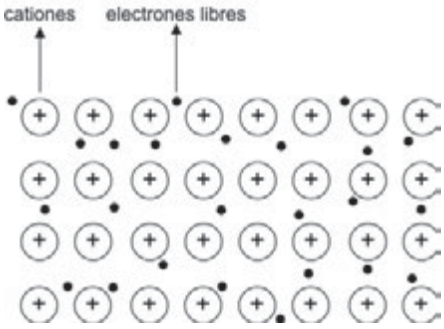


Figura 4.13. *Electrones libres en un enlace metálico*

Si por el contrario todos los electrones de valencia son necesarios para crear los enlaces de los átomos de un material, no existirán electrones libres y por tanto en este caso el material se comportará como un buen dieléctrico.

Por tanto, dependiendo del número de electrones libres que existan se presentará una mayor o menor conductividad. Sin embargo, en el caso de materiales con propiedades dieléctricas puede ocurrir que por alguna causa externa, como por ejemplo el calor o la presencia de impurezas en el material, se produzca una energía suficiente que haga que alguno de los enlaces se rompa y un electrón pase a estar libre y por tanto a convertir dicho material en conductor. A este tipo de materiales se les denomina semiconductores.

4.2.1.2 Teoría de bandas

Para poder explicar de forma rigurosa el comportamiento de los semiconductores sería necesario aplicar mecánica cuántica, lo que queda fuera del alcance de este libro. Sin embargo, se puede hacer una aproximación a este tipo de materiales usando la **teoría de bandas** de conducción y el concepto de hueco, propuesto por Frenkel en 1933.

Partamos de un material en el que todos sus electrones forman parte de los enlaces que forman dicho material. Mediante un campo externo se puede generar una fuerza que haga que algunos electrones dejen de participar en los enlaces y queden libres para conducir.

La energía necesaria para que un electrón pase a ser libre se denomina generalmente E_g (g proviene de la palabra inglesa *gap*, que quiere decir hueco o salto). Esta energía E_g se puede calcular a partir de la fuerza que mantiene a los electrones unidos, que a su vez depende del modulo del campo eléctrico y por tanto del tipo de red de enlaces y de los electrones que los formen. Por tanto el valor de E_g depende del tipo de material y la cristalización (tipo de enlaces) en las que éste se presente.

Por tanto, habrá electrones que tengan una energía más pequeña que otros, siendo los primeros los que forman los enlaces y los segundos los que se encuentran libres. Esto genera dos rangos de energías que se denominan banda de valencia (electrones de los enlaces) y banda de conducción (electrones libres). Entre estas dos bandas puede existir un hueco, denominado banda prohibida, que las separa con una distancia de energía E_g. Si un electrón adquiere la energía necesaria puede saltar de una banda a otra.

En materiales que tienen buenas características de conducción, como los metales, las dos bandas se encuentran solapadas mientras que en los materiales con buenas características de dieléctrico estas bandas se encuentran alejadas. Si la energía E_g es mayor que 3 eV se suele decir que el material es dieléctrico.

El plomo, al ser un metal, presenta una E_g de 0 mientras que el carbono necesita una energía de 5.4 eV. Entre medias de ambos tipos de material se encuentran otros, como el silicio, cuya energía E_g tiene un valor intermedio que permite provocar fácilmente que algunos enlaces se rompan y se queden algunos electrones libres. El silicio, por ejemplo, tiene una E_g de 1.1 eV.

La Figura 4.14 muestra los tres tipos de materiales y sus bandas de valencia y conducción.

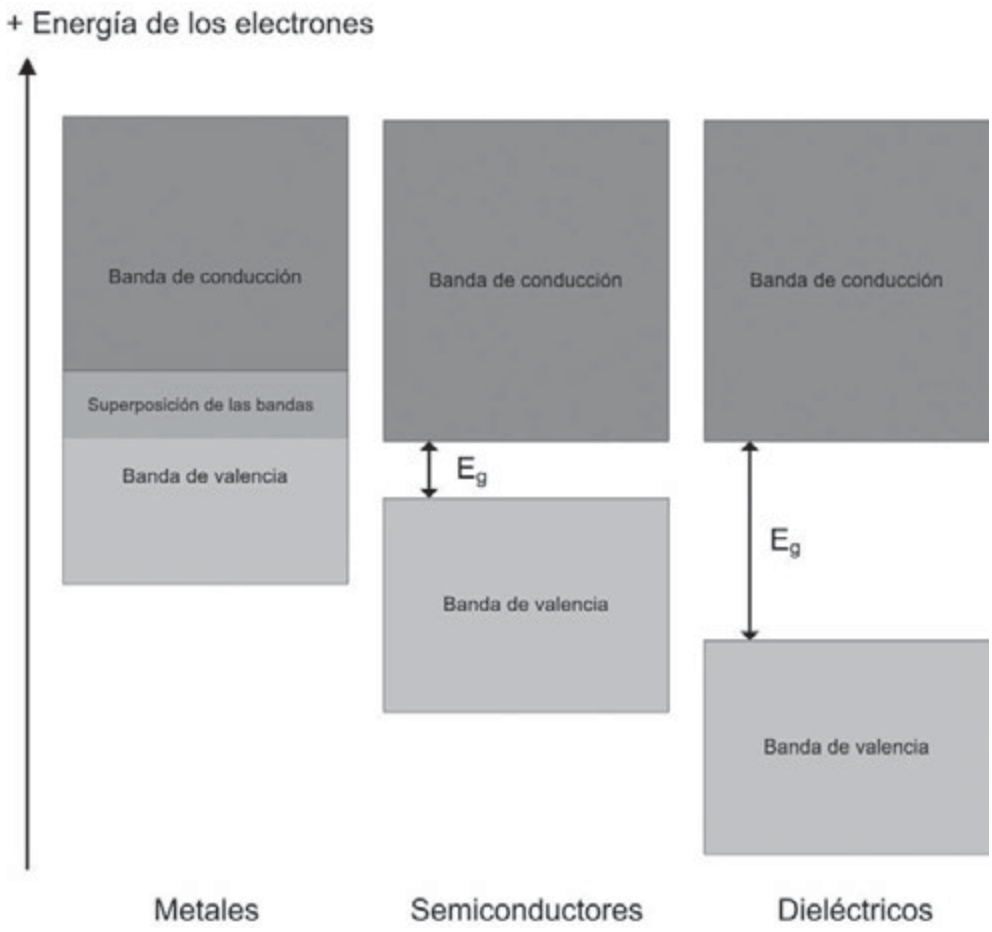


Figura 4.14. *Bandas de conducción y valencia para los metales, semiconductores y dieléctricos*

Cuando en un enlace se libera un electrón, el núcleo se convierte en un catión y por tanto con carga positiva. Esa carga positiva hace que exista un hueco libre para que un nuevo electrón pase a formar parte del enlace. Aunque un hueco no es más que la ausencia de un electrón, se puede pensar en ellos como entes con movimiento y carga propios, un movimiento que en realidad está supeditado al movimiento de los electrones y una carga que es igual que la de un electrón pero de signo positivo. Por tanto, cuando en un semiconductor se consiga liberar electrones se producirá un movimiento de los mismos dejando huecos que podrán ser ocupados por otros electrones, los cuales a su vez generarán otros huecos. Si imaginamos un escenario donde este proceso se repita muchas veces podríamos pensar que las cargas positivas (huecos) se están desplazando cuando en realidad son los electrones los que se mueven.

En la Figura 4.15 se muestra un ejemplo sobre un cristal de silicio. Hay que tener en cuenta que el silicio tiene cuatro electrones de valencia y que se usan los cuatro para formar enlaces con los cuatro átomos vecinos. De esta forma por cada electrón hay 8 enlaces formados por los 4 electrones de valencia del átomo y un electrón de cada átomo vecino. Se puede visualizar en la figura que los electrones se van moviendo en un sentido mientras que los huecos se desplazan en el sentido contrario.

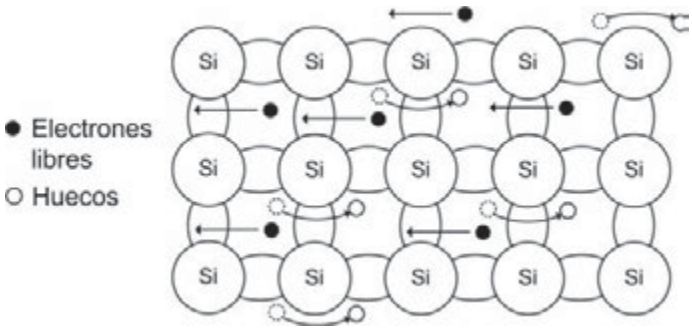


Figura 4.15. *Desplazamientos de electrones y huecos en un dieléctrico*

4.2.1.3 Dopado de semiconductores

Los semiconductores se suelen clasificar en dos grandes grupos: intrínsecos y extrínsecos. En los primeros la concentración de huecos únicamente depende de la temperatura y de la energía *Eg*. Sin embargo, realmente es muy difícil encontrar en la naturaleza materiales semiconductores que sean completamente puros y por el contrario casi siempre contienen algún tipo de impureza en menor o mayor grado. Generalmente un semiconductor se considera puro si hay menos de 0,1% de átomos de impureza. A estos materiales semiconductores con impurezas o dopados se les denomina **semiconductores extrínsecos**.

El interés de dopar un semiconductor es el de poder controlar fácilmente sus propiedades de conducción eléctrica. Si por ejemplo, en un cristal de silicio como el de la Figura 4.15, se introduce un átomo de boro, que tiene 3 electrones de valencia, éste usará estos 3 electrones para formar enlace con los cuatro vecinos y quedará, por tanto, un hueco capaz de aceptar un electrón para formar un nuevo enlace. Si algún electrón de los átomos vecinos queda libre, puede ocupar ese hueco provocando otro hueco, carga positiva, en el átomo que liberó el electrón. Este tipo de impurezas se denominan **impurezas aceptoras**.

Si por el contrario, en el mismo ejemplo, la impureza introducida es la de un elemento con 5 electrones de valencia, como el fósforo, el átomo de impureza usará 4 electrones para formar los enlaces con los átomos de silicio vecinos y quedará un electrón libre, dando carga negativa al conjunto. Este tipo de impurezas se denominan impurezas donadoras.

La Figura 4.16 muestra los dos ejemplos de impurezas aceptoras y donadoras.

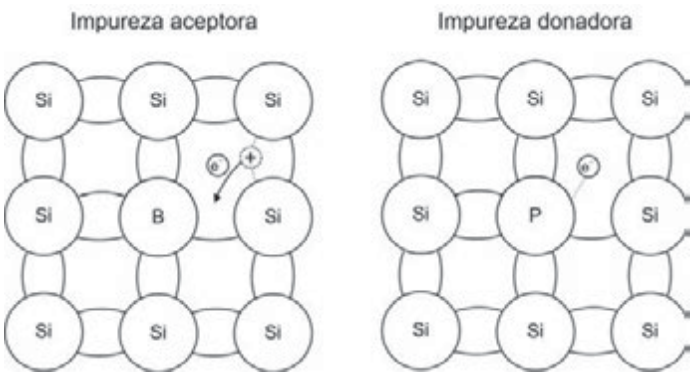


Figura 4.16. *Impurezas aceptoras y donadoras*

A los semiconductores con impurezas aceptoras se los denomina de tipo *p* (p de positivo) mientras que a los semiconductores con impurezas donadoras se los denomina de tipo *n*.

Anteriormente se ha mencionado que las propiedades eléctricas de un semiconductor pueden variar con la temperatura y en este apartado se ha expuesto que también pueden modificar su comportamiento mediante el dopado usando impurezas donadoras o aceptoras. La Figura 4.17 muestra una representación de la inversa de la temperatura en el eje de abscisas y la densidad de portadores (electrones o huecos) en el eje de ordenadas. Se puede ver que en temperaturas medias la densidad de portadores permanece casi constante y esto se debe a que la conducción se produce por los electrones de las impurezas donadoras. C Sin embargo, cuando la temperatura es alta (cerca del eje de ordenadas) se produce un crecimiento del número de portadores ya que la energía térmica es suficiente para propiciar la liberación de electrones intrínsecos, que terminan por convertir en despreciable el movimiento de los electrones de las impurezas donadoras. En este caso se habla de que el semiconductor se comporta como un semiconductor intrínseco. Por último, si la temperatura es suficientemente baja, el semiconductor se queda en un estado en el que los electrones de la impureza donadora no se mueven y se habla de un estado de congelación (*freez-out*) del semiconductor.

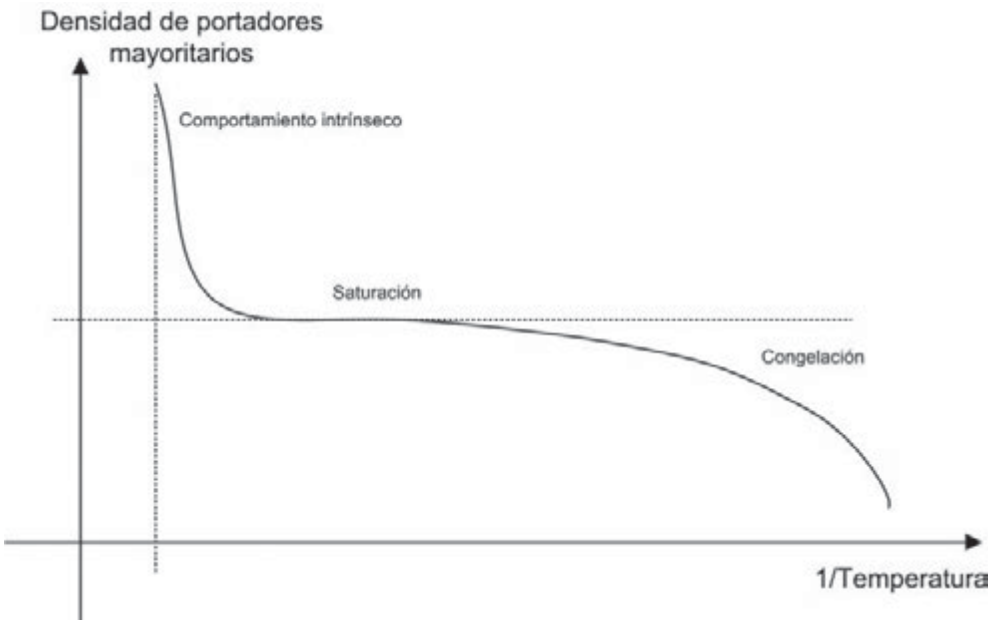


Figura 4.17. *Gráfica de densidad de portadores mayoritarios frente a temperatura*

Lo visto hasta ahora supone que cuando se introduce una impureza donadora (tipo *n*), en temperaturas adecuadas, el portador que aparece son los electrones que no forman enlaces. Estos electrones libres provocan que se genere más movimiento de electrones incluso llegando a generar huecos mientras se produce dicho movimiento. Por eso, en un semiconductor de tipo *n* se dice que el portador mayoritario son los electrones y el minoritario los huecos. Para un semiconductor de tipo *p* ocurre justo lo contrario, siendo los huecos los portadores mayoritarios y los electrones los minoritarios.

4.2.1.4 Uniones de semiconductores

La **unión de semiconductores** de distinto tipo tiene unas propiedades muy interesantes que han convertido estas uniones en la base de diversos dispositivos electrónicos. En este apartado se va a estudiar la unión *pn* y posteriormente se expondrá como usando este tipo de unión se construye los diodos.

Una **unión pn** consiste en juntar un semiconductor de tipo n con uno de tipo *p*. Para poder llevar esto a cabo no basta con juntar ambos semiconductores ya que la forma de cristalización es muy importante para que en la unión no haya variaciones en las propiedades eléctricas. Para ello, se parte de un cristal semiconductor dopado de un tipo determinado y en una región del mismo se dopa de forma contraria. Esto se puede hacer usando calor o bien mediante un gas y un proceso de difusión. La región de tipo *p* contendrá huecos mayoritariamente mientras que la de tipo *n* contendrá mayoritariamente electrones. La Figura 4.18 muestra una unión *pn*.

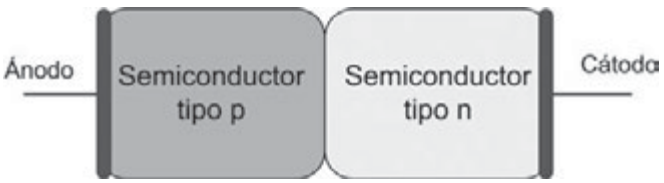


Figura 4.18. *Unión p-n*

Al juntar las dos regiones, por un proceso de difusión, los electrones tenderán a ir de la región *n* hacia la región *p* y por el contrario los huecos intentarán trasladarse hacia la región *n*. Esto provoca que cerca de la unión ambos aparezcan cargas negativas en el lado del semiconductor *p* y positiva en el de tipo *n*. Esta doble carga crea una situación de equilibrio y genera una barrera de diferencia de potencial que impide que más electrones pasen de una región a la otra. Esta zona de barrera se conoce como zona de depleción.

4.2.2 DIODOS

Un **diodo** es un componente semiconductor que permite la circulación de corriente eléctrica en un sentido pero la bloquea en el contrario. Consta de dos terminales llamados ánodo y cátodo de forma que la corriente circula desde el primero al segundo. La Figura 4.19 muestra el símbolo usado para representar un diodo y el sentido de la corriente, que viene determinado por la dirección de la punta del triángulo.

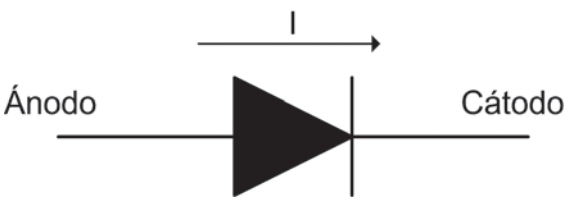


Figura 4.19. *Símbolo de diodo*

Un diodo ideal presenta resistencia nula al paso de corriente en una dirección y por el contrario resistencia infinita en la dirección opuesta. La Figura 4.20 muestra la curva ideal de un diodo relacionando la diferencia de potencial con la intensidad. Cuando la diferencia de potencial es 0 por la ley de Ohm la resistencia es así mismo 0 ($R=V/I=0/I$). Si por el contrario la diferencia de potencial es menor que cero la resistencia es infinita ($R=V/I=V/0=\infty$).

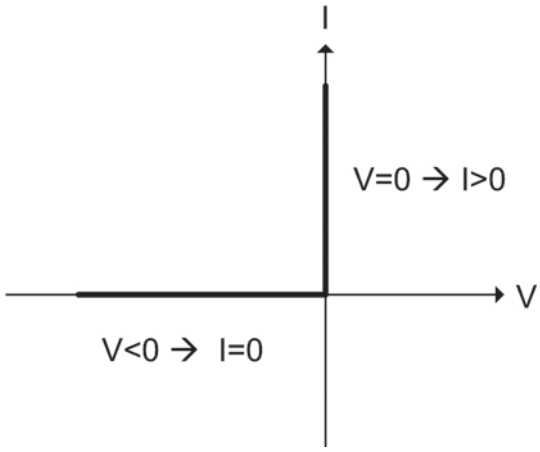


Figura 4.20. *Curva de un diodo ideal*

Si aplicamos este comportamiento a un circuito que consta de un diodo ideal una resistencia y una fuente (como el de la Figura 4.21) nos encontramos con que según la orientación del diodo el comportamiento del circuito será el de un circuito abierto. En el ejemplo de la figura el sentido de la corriente es en sentido horario.

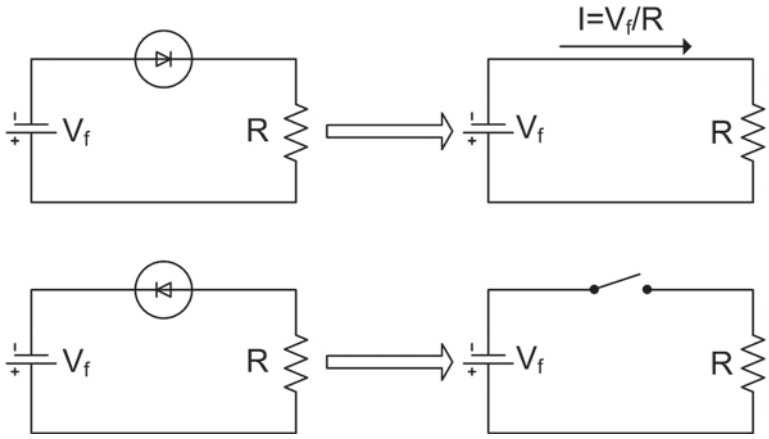


Figura 4.21. *Circuito equivalente con polarización directa y polarización inversa de un diodo*

Los diodos se fabrican usando las uniones *pn* expuestas en el apartado anterior. A la estructura *pn* se le añaden los dos terminales, ánodo y cátodo, conectados a las regiones *p* y *n* respectivamente. Hoy en día los diodos *pn* se fabrican usando dos configuraciones: vertical y plana (ver Figura 4.22).

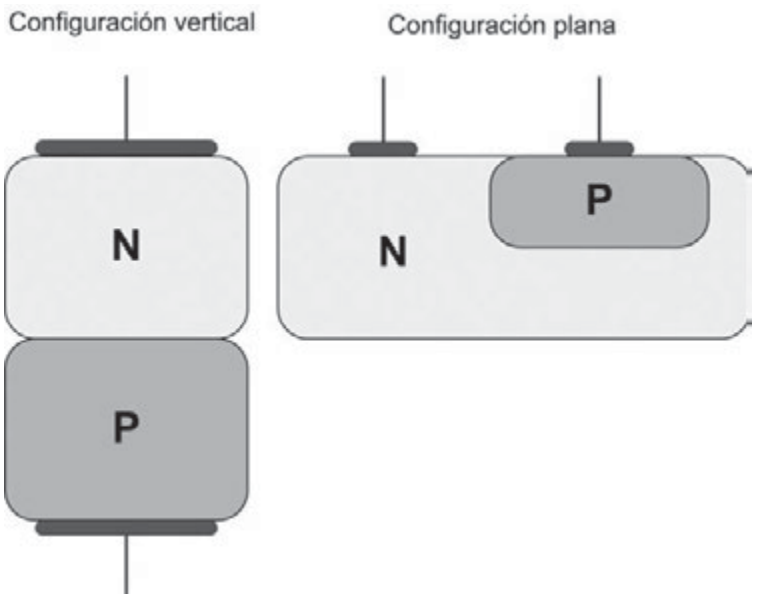


Figura 4.22. *Configuraciones de diodos*

4.2.2.1 Polarización del diodo

Tal y como se ha visto en el apartado anterior, las uniones *pn* sin ningún tipo de agente externo son estables y no presentan corriente eléctrica, ya que la zona de depleción no permite el paso de electrones. Sin embargo, si se aplica una tensión positiva en el ánodo de un diodo (y por tanto en el borde externos de la región *p* de una unión *pn*) se producirá un campo eléctrico que obligará a los huecos a acercarse a la unión y provocará un estrechamiento de la zona de depleción. Si la tensión que se aplica es suficientemente grande puede ocurrir que la zona de depleción sea tan pequeña que la unión *pn* empiece a conducir corriente. A este tipo de polarización se le denomina polarización directa

Si por el contrario, se aplica una polarización inversa, es decir, una tensión positiva en el cátodo (borde de la región *n*) y negativa en el ánodo (borde de la región *p*), se produce el efecto contrario. Esto es, los portadores mayoritarios se desplazarán alejándose de la unión; los huecos de la región *p* se desplazarán hacia el borde del ánodo y los electrones de la región *n* se desplazarán hacia el borde del cátodo. El efecto que esto produce es que la zona de depleción se ensanche y por tanto no se produzca conducción.

En un diodo real, en el caso de polarización inversa, se produce un efecto adicional y es que mientras que los portadores mayoritarios se alejan de la unión, los portadores minoritarios se acercan provocando una pequeña corriente, que es muy inferior a la creada en polarización directa bajo la misma tensión aplicada

En un diodo real la relación entre la tensión y la intensidad no es tan perfecta como en la Figura 4.23 sino que existe una tensión de barrera (V_{ON}) que hasta que no se alcanza la corriente que circula es muy pequeña ya que no se ha estrechado la zona de depleción de la unión *pn*. Para los diodos de silicio está tensión suele ser muy cercana a 0,7 V. Por otro lado, cuando la tensión es negativa (polarización inversa) la intensidad es cercana a 0 hasta que se alcanza un máximo en el que se produce un estado denominado de ruptura y a partir del cual el diodo vuelve a conducir.

La expresión que representa dicho comportamiento es la siguiente:

$$I = I_S \left(e^{\frac{V - IR}{nV_T}} - 1 \right) \qquad \text{(Ec. 4.25)}$$

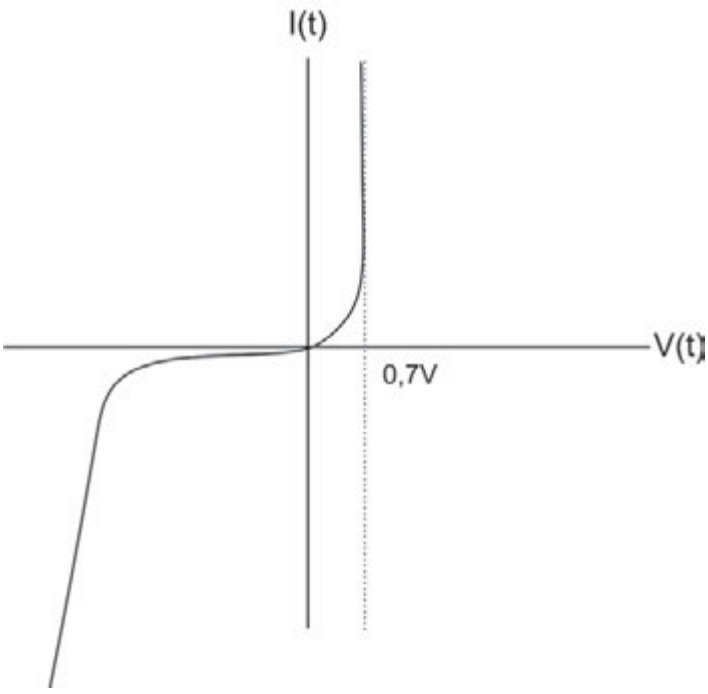


Figura 4.23. *Curva real de un diodo*

donde:

- I_s es la intensidad inversa de saturación del diodo. Depende del material, el tipo de dopado y la temperatura.
- R es la resistencia combinada de las zonas p y n.
- n es el factor de idealidad (entre 1 y 2 dependiendo de las dimensiones del diodo, el material o la intensidad I_s).
- V_T es el potencial térmico del diodo y es una función de la constante de Boltzmanm (K), la carga del electrón (q) y la temperatura absoluta del diodo (T). Generalmente se encuentra alrededor de 27,71 mV para temperatura ambiente de 25º. Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$V_T = \frac{K}{q} T \qquad \text{(Ec. 4.26)}$$

La Figura 4.23 muestra una aproximación a la curva de un diodo real.

Si se asumen algunas condiciones como un valor de idealidad de $n = 1$ y que la resistencia es muy pequeña y despreciable se obtiene la expresión para un diodo ideal:

$$I = I_S\left(e^{V/V_T} - 1\right) \qquad \text{(Ec. 4.27)}$$

ACTIVIDADES 4.6

- ¿Es importante limitar la corriente que circula por un diodo en polarización directa?
- Busca información por Internet sobre los optoacopladores y sobre los sensores ópticos.

¿SABÍAS QUE...?

En inglés, se dice:
- Diodo: *diode*.
- Ánodo: *anode*.
- Cátodo: *cathode*.
- Polarización directa: *forward polarization*.
- Polarización inversa: *reverse polarization*.

4.2.2.2 Otros tipos de diodos

Además del diodo expuesto anteriormente (conocido también como diodo rectificador o RF, que permite el paso de corriente solo en un sentido y que se usará para rectificación en capítulos posteriores), existen otros tipos:

- **Diodo de capacidad variable** (**Varicap**): es un tipo de diodo que polarizado de forma inversa crea una resistencia elevada que lo convierte en un condensador con una perdida muy baja. Si se varía la tensión de polarización la capacidad que se genera varía de forma que se puede usar como un condensador con capacidad variable, de ahí el nombre Varicap.
- **Diodo Zener**: este diodo es un diodo similar al diodo RF pero que cuando se polariza inversamente presenta una tensión umbral, llamada tensión Zener, a partir de la cual el diodo comienza a conducir una determinada cantidad de corriente. Este tipo de diodos se emplean en circuitos reguladores tal y como se verá en capítulos posteriores.
- **Fotodiodo**: este tipo de diodo tiene una fabricación que hace que las condiciones lumínicas afecten a su capacidad de conducción.

- **Diodo LED** (*Light Emitting Diode*): Este tipo de diodos debido a los materiales con los que se fabrica son luminiscentes cuando se polarizan de forma directa. El principio básico es que cuando se produce una ocupación de un hueco por parte de un electrón se produce una liberación de energía que dependiendo del material puede provocar una radiación en forma de luz. Los diodos LED se usan de forma muy habitual, y aunque es una tecnología relativamente antigua hoy en día se están empezando a usar en muy distintos ámbitos incluyendo la fabricación de semáforos o bombillas para uso doméstico. La Figura 4.24 muestra un diodo LED típico.

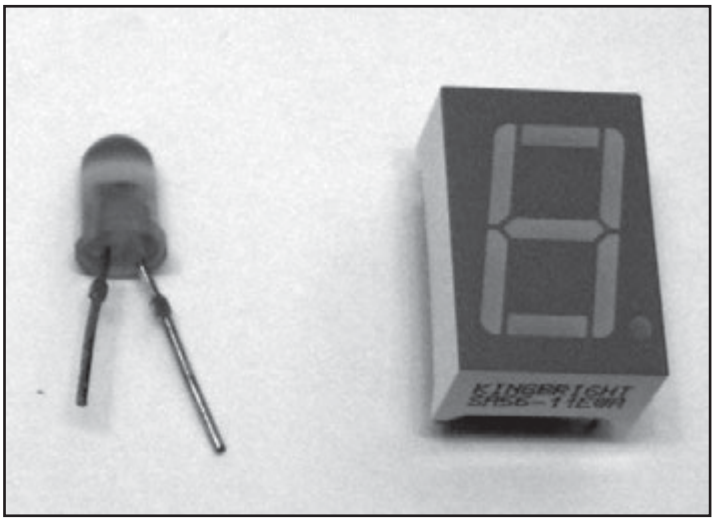


Figura 4.24. *Diodo LED*

¿SABÍAS QUE...?

La utilidad de los diodos LED es muy amplia, ya que pueden usarse como indicadores de presencia de tensión en circuitos eléctricos, como iluminación con bajo consumo, semáforos, construcción de *displays*, etc.

¿SABÍAS QUE...?

La intensidad mínima para que un diodo emita luz visible es de 4 mA y como máximo debería aplicarse 50 mA.

ACTIVIDADES 4.7

- Busca en Internet las características principales y las aplicaciones de los diodos láser.
- Busca las características y tecnologías de fabricación de los *displays* de cristal líquido (LCD).
- ¿Qué tecnologías se utilizan en las nuevas televisiones LED?
- Comprueba el estado de un diodo LED utilizando un multímetro, ¿cuándo se ilumina?

4.3 CASO PRÁCTICO

Se propone un ejercicio en el que se va a comprobar cómo se carga y se descarga un condensador. Para ello hacen falta papel milimetrado, un cronómetro, una placa de inserción, un voltímetro, cable, una pila de 4,5 V y al menos un condensador y una resistencia. Este ejercicio está pensado para hacer por parejas.

Se deberá construir un circuito como el de la Figura 4.8 y usar la pila como fuente. Una vez conectada la pila el condensador empezará a cargarse y se podrá medir la tensión en sus bornes usando un voltímetro.

Los pasos son los siguientes:

1. Calcular que valores tiene que tener la resistencia para que la constante RC tenga un valor suficiente para poder observar como varía el tiempo. Por ejemplo, un tiempo de alrededor de RC de alrededor de 10 segundos puede ser suficiente.
2. Construir el circuito y conectar la pila a la vez que se pone en marcha el cronómetro.
3. Mientras un compañero realiza la conexión de la pila el otro compañero irá apuntando las medidas del voltaje cada cierto tiempo, por ejemplo cada 5 segundos.
4. Las muestras tomadas se representarán en un papel milimetrado y se comprobará que cercanas a las esperadas teóricamente.
5. Una vez cargado el condensador se procederá a la descarga del mismo cortocircuitando (con un cable por ejemplo) los terminales del condensador y la resistencia que antes estaban conectado a la fuente. Se tomarán datos igual que en la carga y se dibujará la gráfica.

Opcionalmente, se podrán conectar resistencias en serie o paralelo así como condensadores en serie o paralelo y se estudiará como se modifica el comportamiento de carga y descarga.

RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se han introducido los conceptos y componentes más básicos que se encuentran presentes en circuitos de electrónica analógica. En primer lugar se ha diferenciado en dos grandes grupos de componentes: pasivos y activos.

En el grupo de los activos se han mostrado las resistencias, condensadores y bobinas y la teoría necesaria para el cálculo de asociaciones de componentes.

Se ha indicado que las resistencias permiten distribuir la corriente eléctrica y la tensión a todos los puntos de un circuito.

Se ha visto que el condensador está diseñado para almacenar carga eléctrica en un superficie reducida.

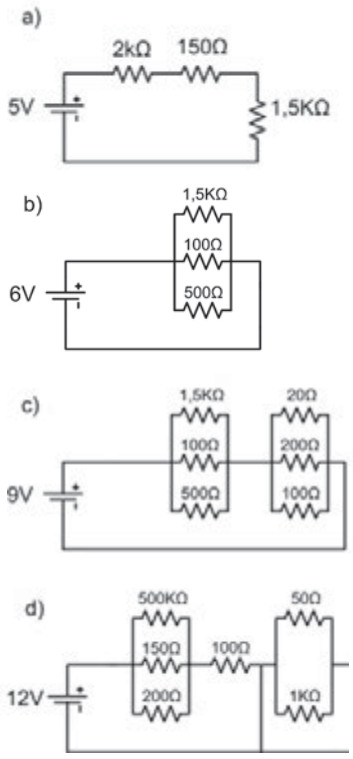
De la misma manera, se ha indicado que la bobina se utiliza para crear inducción magnética a partir de la corriente eléctrica.

Posteriormente, se ha introducido el concepto de semiconductor y la teoría base que los sustenta para luego detallar el funcionamiento y construcción de los diodos.

Finalmente, se han visto las aplicaciones de los diodos en la vida y el trabajo de las personas, actualmente.

EJERCICIOS PROPUESTOS

1. Dados los siguientes circuitos con resistencias:

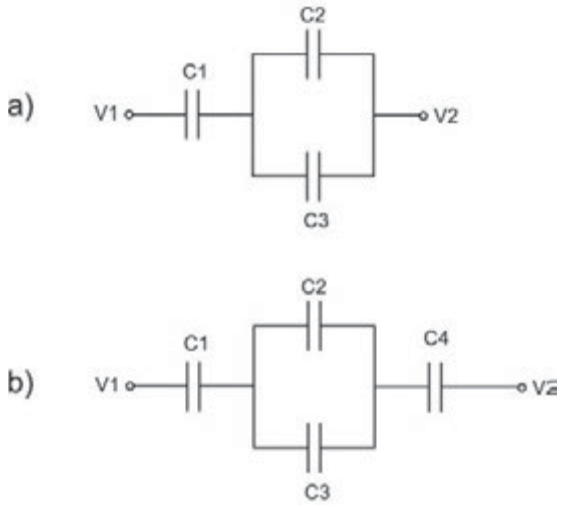


Calcular:

- La resistencia total equivalente.
- La intensidad a través de cada resistencia.
- La diferencia de potencial en los extremos de las resistencias.

2. ¿Cuál será la capacidad de un condensador formado por dos placas de 400 cm^2 de Superficie separadas por una lámina de papel de 1,5mm de espesor cuya constante dieléctrica relativa es 3,5?

3. Calcular a) la capacidad equivalente y b) la carga almacenada en cada condensador; sabiendo que: V2-V1 = 150 V, C1 = 6 uF, C2 = 1 uF, C3 = 2 uF, C4 = 10 uF:



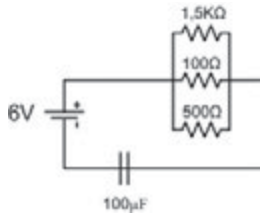
Calcular:

- La capacidad total equivalente.
- La carga acumulada en cada condensador.

4. Dado el un circuito RC como el de la Figura 4.8, con V_f = 6 V, C = 15 µf y R = 10 KΩ

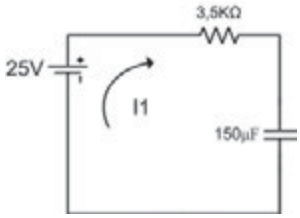
- Calcular la constante de tiempo.
- La tensión de carga del condensador después de 1,5 milisegundos.
- La tensión de carga después de un tiempo 2 RC.
- La intensidad que existe en la resistencia transcurridos 1,5 milisegundos.
- El instante de tiempo en el que la tensión en el condensador es de 4 V.

5. Calcular la tensión de carga del condensador del siguiente circuito en los instantes t = 0,5 us, t = 1 us y t = 2 us:



6. En el circuito de la siguiente figura, calcular:

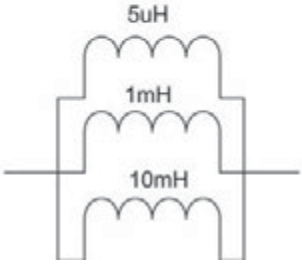
- La constante de tiempo RC
- I1 e I2 para $t = 0$, $t = 1$ seg y t = infinito.



- **7.** Dados los siguientes circuitos calcular la inductancia total del mismo:

a)

b)



TEST DE CONOCIMIENTOS

1 El flujo magnético de una bobina aumenta si:
- a) Se incrementa la intensidad de la corriente que fluye por ella.
- b) Se modifica la geometría y materiales de la bobina.
- c) Las dos anteriores son correctas.
- d) Ninguna de las anteriores es correcta.

2 La tensión umbral a partir de la cual conduce un diodo RF es:
- a) 0,5 V.
- b) 0,7 V.
- c) 1 V.
- d) Nunca conduce.

3 En un semiconductor con impurezas donadoras los portadores mayoritarios son:
- a) Los electrones.
- b) Los huecos.
- c) Los electrones y huecos por igual.
- d) Ninguna de las anteriores.

4 Un diodo LED tiene la característica de:
- a) Actúa como un condensador variable.
- b) Emite luz.
- c) Es capaz de absorber luz.
- d) Ninguna de las anteriores.

5 Un diodo permite el paso de corriente si se polariza:
- a) De forma directa.
- b) De forma inversa.
- c) Siempre conduce.
- d) Nunca conduce.

5 Transistores bipolares

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- ✓ Asumir la importancia de los componentes activos en general y de los transistores en particular.
- ✓ Comprender su estructura y su funcionamiento interno.
- ✓ Diferenciar los diferentes modos de funcionamiento.
- ✓ Ser capaz de polarizar un transistor de acuerdo con el funcionamiento deseado.
- ✓ Analizar correctamente los circuitos amplificadores a transistor bipolar.

Los componentes electrónicos vistos hasta ahora permiten controlar las características de una determinada señal eléctrica. Dicho control se realiza a través de unas condiciones que el componente establece entre la tensión y la intensidad de la señal que lo atraviesa. De este modo, una resistencia establece un factor de proporción fijo entre tensión e intensidad, un condensador impide cambios bruscos en la tensión, etc.

Aunque ya se han estudiado en capítulos anteriores algunos componentes activos, como son los diodos, capaces de permitir el paso de la intensidad en un solo sentido, con los componentes ya vistos no podemos realizar una tarea que incluso intuitivamente resulta fundamental en cualquier circuito electrónico de complejidad moderada: el control de una señal con otra señal. Parece deseable tener un componente que permita controlar establecer unas condiciones i-v a la señal eléctrica que lo atraviesa, y que sea capaz de modificar esas condiciones en función de una segunda señal (señal de control).

¿SABÍAS QUE...?

El dispositivo eléctrico más antiguo capaz de realizar este tipo de control es el relé, inventado por Joseph Henry en 1835, y que no es más que un interruptor controlado por una bobina y un electroimán. Se trata por tanto de un componente electromecánico.

A principios del siglo XX aparecen los “tríodos”, dispositivos de 3 terminales formados por una válvula de vacío a la que se la añade un electrodo de control (llamado *rejilla*) que permite modificar el flujo de electrones desde el cátodo hacia el ánodo. La invención del tríodo fue consecuencia de muchos trabajos prácticamente simultáneos, siendo la primera patente registrada por Lee De Forest para un dispositivo muy similar (poseía los 3 terminales, pero no trabajaba en el vacío) al que denominó “Audion”.

¿SABÍAS QUE...?

El primer tríodo de vacío propiamente dicho lo desarrolló Irving Langmuir, en los laboratorios de la General Electric en Nueva York en 1915.

El principal problema de los tríodos era su gran tamaño y consumo. Conforme avanzan los conocimientos de física del estado sólido, se comienza a investigar sobre la posibilidad de utilizar estos nuevos conocimientos para desarrollar un dispositivo que cumpla la función de esas válvulas. Y a partir de los experimentos de John Bardeen y Walter Brattain, realizados en 1947 en los Laboratorios Bell en Estados Unidos, junto con el líder del grupo de trabajo William Shockley, los tres co-inventaron el moderno **transistor bipolar**, por lo cual les fue otorgado el Premio Nobel de Física en 1956.

El transistor es el componente electrónico más importante de la práctica totalidad de los circuitos electrónicos actuales, y es indispensable para la realización de circuitos digitales. Un microprocesador moderno (como el Intel Core i7) puede contener más de 700 millones de transistores. Todo esto hace que el transistor sea considerado uno de los inventos más relevantes del siglo XX.

5.1 ESTRUCTURA FÍSICA DEL TRANSISTOR

En este capítulo se van a estudiar los transistores bipolares (también llamados transistores de unión bipolar, o simplemente de unión, "Bipolar Junction Transistor", BJT, por sus siglas en inglés). Aunque existen otros tipos de transistores, su funcionamiento es similar y pueden considerarse como versiones modificadas del que se estudia aquí.

Para poder comprender como se comporta un transistor, y como utilizarlo, es necesaria una visión previa sobre su construcción y estructura.

5.1.1 LA UNIÓN BIPOLAR. TERMINALES DEL TRANSISTOR

Un transistor bipolar está formado por tres regiones semiconductoras dopadas. Como ya es sabido, los componentes semiconductores son aislantes en estado puro, pero puede convertirse en conductores mediante la adición de pequeñas cantidades de elementos dopantes. Los semiconductores son elementos químicos pertenecientes al grupo IV (por tener cuatro electrones en su orbital de valencia), que pueden ser dopados con elementos del grupo V (dando lugar a un ligero superávit de electrones, lo que se llama semiconductor tipo N) o con elementos del grupo IV (creando un ligero déficit de electrones y un semiconductor de tipo P). El semiconductor más utilizado para la fabricación de transistores es el silicio (Si), aunque también existen transistores de germanio (Ge) y, para aplicaciones de alta frecuencia, arseniuro de galio (GaAs).

Un BJT se compone de dos regiones del mismo tipo (N o P) separadas por una región del tipo contrario. Cada una de ellas está conectada a uno de los tres terminales del dispositivo, llamados *emisor*, *base* y *colector*. Dependiendo de si la región de separación es de tipo P o N, se habla de transistor bipolar tipo **NPN** o tipo **PNP**.

Tabla 5.1

	NPN	PNP
Emisor	N	P
Base	P	N
Colector	N	P

La Figura 5.1 muestra una representación conceptual de la estructura de un transistor de unión, tipo NPN. Como puede observarse, la base (tipo P), de dopaje débil y gran resistividad, separa las regiones semiconductoras de tipo N. La unión base-colector es mucho mayor que la unión emisor-base. Debido a ello, y a que el dopaje del emisor es más elevado que el del colector, los transistores de unión usuales son asimétricos, es decir, que los terminales emisor y colector no son intercambiables.

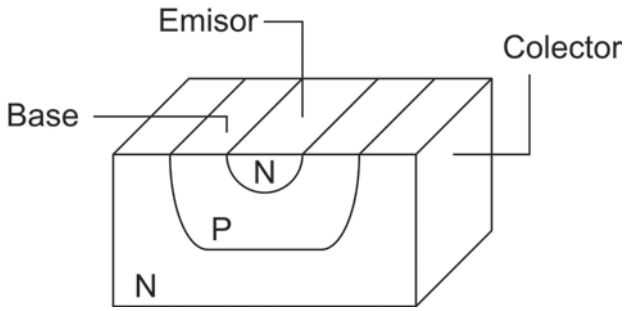


Figura 5.1. *Estructura de un transistor bipolar NPN*

5.1.2 FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSISTORES NPN Y PNP

Un transistor puede considerarse como la unión de dos diodos que comparten un único ánodo, y por tanto contiene dos uniones semiconductoras: la unión emisor-base y la unión base-colector. Para comprender su funcionamiento son necesarias unas notas previas acerca del modo en que la corriente eléctrica se transmite por estos materiales.

Es de sobra conocido que la corriente eléctrica está causada por el movimiento de los electrones a lo largo de un conductor, y que la cantidad de ese movimiento lo medimos mediante la intensidad eléctrica (en culombios/segundo). Como la carga del electrón es conocida, e igual a 1,602E-19 culombios, podemos establecer una relación directa entre la intensidad en un conductor y el número de electrones que lo atraviesan por segundo.

Ahora bien, los materiales semiconductores no permiten el paso de la corriente con la misma facilidad que los metales u otros conductores. A pesar del dopaje, los electrones pasan con mayor dificultad de un átomo a otro; ésta dificultad de movimiento hace que aparezcan los denominados *huecos*, que son átomos que han perdido un electrón y aún no han conseguido otro, y están por tanto cargados positivamente (y con una carga igual a la del electrón, pero de signo contrario). En los semiconductores, estos "huecos" se mueven en el interior del material, y como partículas cargadas que son, participan también en la generación de corriente. Por ello se dice que tanto los electrones como los huecos son "portadores" de corriente. Al tipo de portador más frecuente en una determinada región semiconductora se le llama *portador mayoritario*, y al otro, *portador minoritario*. Es debido a este funcionamiento basado en dos tipos de carga, en lugar de únicamente en el movimiento de electrones, por lo que a estos transistores se les llama *bipolares*.

Tabla 5.2

	Portador mayoritario	Portador minoritario
N	Electrón	Hueco
P	Hueco	Electrón

En funcionamiento normal, la unión emisor-base está polarizada directamente (esto quiere decir que la región *N* tiene un potencial eléctrico inferior al de la región *P*). Al igual que ocurría en los diodos, si el potencial de polarización supera la tensión umbral (aproximadamente 0.7 V para los transistores de silicio), los portadores mayoritarios comenzarán a pasar del emisor a la base. Para evitar una excesiva recombinación con los portadores de signo contrario en la base, ésta última debe ser muy delgada y estar solo ligeramente dopada. Una vez ahí, los portadores

provenientes del emisor son captados por el colector (ya que la unión base-colector se polariza inversamente) y abandonan el transistor por ese terminal. A continuación vamos a estudiar este funcionamiento, particularizado para los transistores NPN y PNP.

5.1.2.1 NPN

El símbolo del transistor NPN aparece en la Figura 5.2. La flecha simboliza la dirección de la corriente eléctrica en el modo de operación habitual, en que la unión emisor-base esta polarizada directamente y la base-colector lo está inversamente.

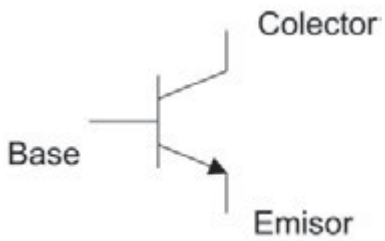


Figura 5.2. *Símbolo eléctrico del transistor NPN*

El diagrama simplificado de un circuito que polariza dichas zonas semiconductoras se muestra en la Figura 5.3. Como ya se ha visto, si la diferencia de potencial entre el emisor y la base (V_{BE}) supera la tensión umbral de 0.7 V, los electrones del emisor comenzarán a pasar a la base. Algunos de ellos se recombinarán con los huecos en ésta región, pero, dada la especial construcción del transistor, la mayoría de ellos serán atraídos por el colector, que estará a un potencial mayor que la base (unión *B-C* inversamente polarizada).

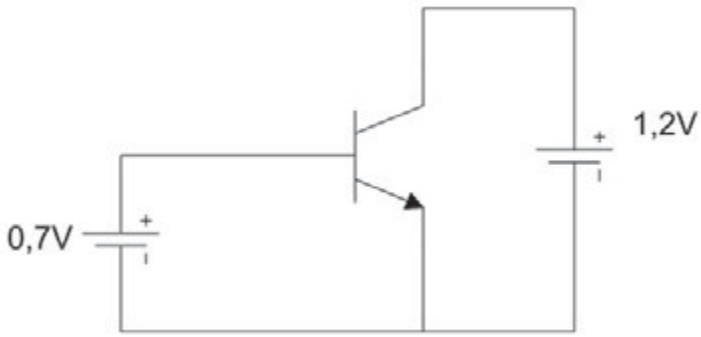


Figura 5.3. *Polarización de un transistor NPN*

La polarización directa de la unión *E-B* también causa el paso de huecos de la base al emisor, si bien al tener la base un dopaje ligero, la corriente que estos generan (corriente de base) es muy inferior a la que se genera entre el emisor y el colector.

5.1.2.2 PNP

El símbolo del transistor PNP aparece en la Figura 5.4. Puede observarse como la flecha apunta en el sentido contrario al anterior, siguiendo la corriente eléctrica en el modo habitual de funcionamiento. Como se ve en el circuito esquemático de la Figura 5.5, la polarización directa de la unión *E-B* crea un flujo de huecos que entran en la base desde el emisor, y son atraídos por el colector tipo *P* al estar la unión *B-C* inversamente polarizada.

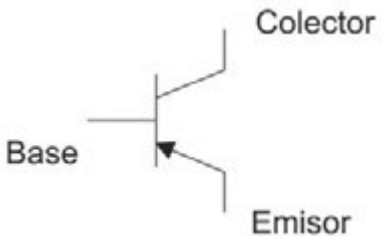


Figura 5.4. *Símbolo eléctrico del transistor PNP*

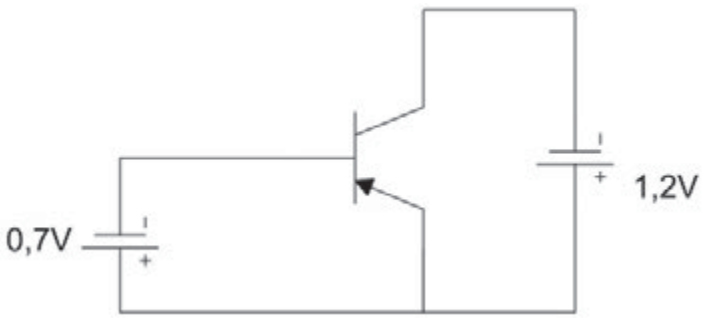


Figura 5.5*. Polarización de un transistor PNP*

Puede observarse que el funcionamiento es prácticamente igual que en el caso NPN. Sin embargo, es mucho más fácil moverse a través del semiconductor para un electrón que para un hueco (un hueco es en realidad un átomo competo al que le falta un electrón, y por tanto tiene mucha mayor masa y una menor movilidad). Esto hace que los transistores NPN, en los que la corriente se genera principalmente mediante el movimiento de electrones, sean capaces de alcanzar mayores corrientes y de trabajar a mayores frecuencias. Debido a ello, la gran mayoría de los transistores bipolares que se utilizan en la industria son de tipo NPN, quedando los PNP reservados para casos y aplicaciones muy específicas.

5.1.3 CORRIENTES Y TENSIONES EN UN TRANSISTOR

Aunque las tensiones y las corrientes pueden asumirse en cualquier sentido, es habitual seguir siempre el mismo criterio en los transistores, porque es como generalmente aparecen en los diseños y en las gráficas con las curvas características que describen a cada dispositivo.

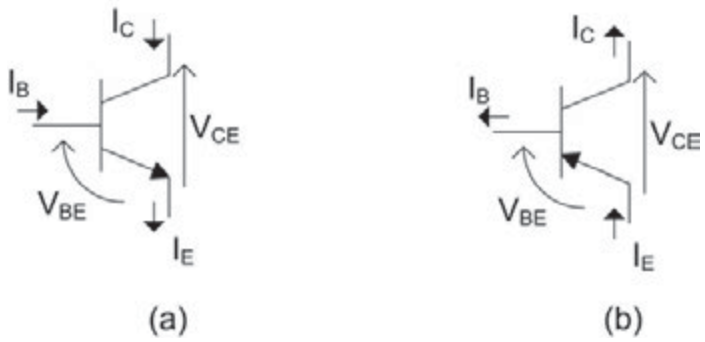


Figura 5.6. *Sentido convencional de las tensiones y corrientes en un transistor (a) NPN y (b) PNP*

La Figura 5.6 muestra un transistor de cada tipo (NPN y PNP), junto con las tensiones y las intensidades en cada uno de los terminales, y el sentido en el que habitualmente se asumen. Con esta convención, el signo de cada una de esas magnitudes en el modo de funcionamiento usual, para los dos tipos, se resume en la siguiente tabla:

Tabla 5.3

	NPN	PNP
VBE **Tensión emisor-base**	Positiva	Negativa
VCE **Tensión colector-emisor**	Positiva	Negativa
IB **Corriente de base**	Entrante	Saliente
IC **Corriente de colector**	Entrante	Saliente
IE **Corriente de emisor**	Saliente	Entrante

Cuando se introdujo el funcionamiento del transistor mediante la física de los semiconductores, se vio que la corriente que circula a través de la base es muy inferior a la que circula entre el emisor y el colector. La relación entre ambas corrientes es prácticamente constante para cada transistor, y viene dado por el llamado **coeficiente beta** (ß). Este coeficiente establece una relación entre las corrientes de base y de colector. Así pues, las ecuaciones de las intensidades para un transistor polarizado de la manera habitual son:

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$I_E = I_c + I_B \approx I_C$$

La potencia disipada en el transistor se calcula a partir de la tensión entre el colector y el emisor, y la corriente de colector. Es decir:

$$P = V_{CE} \cdot I_C$$

ACTIVIDADES 5.1

- En un transistor bipolar con β = 100, ¿cuáles serían las intensidades de colector, de emisor, y la potencia disipada, si I_B = 200 μA y V_{CE} = 6 V?
- Dibuje el símbolo del transistor y el sentido de las corrientes y tensiones para el caso anterior, suponiendo que es un transistor NPN.
- Repítalo para un transistor PNP.

5.1.4 CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE LOS TRANSISTORES

El transistor es un dispositivo complejo, y existen muchas clases y modelos diferentes, cada uno con sus particularidades. Para poder elegir el transistor adecuado para un determinado diseño, es necesario conocer los valores que se utilizan habitualmente para definir el tipo de transistor y sus características.

En primer lugar, es importante destacar que la nomenclatura de los transistores no sigue un esquema uniforme. Cada fabricante utiliza sus propias normas a la hora de identificar mediante un número de parte cada uno de sus transistores. Sin embargo, existen tres sistemas de nomenclatura, y dado que muchos de los grandes fabricantes de semiconductores siguen alguno de ellos, es interesante conocerlos.

El estándar japonés JIS (*Japanese Industrial Standard*) utiliza nombres que comienzan con el prefijo “2S”:

Tabla 5.4

2SA...	Transistor bipolar PNP de alta frecuencia
2SB...	Transistor bipolar PNP de frecuencia de audio
2SC...	Transistor bipolar NPN de alta frecuencia
2SD...	Transistor bipolar NPN de frecuencia de audio

El estándar europeo de nomenclatura “Pro Electron” define prefijos que comienzan con dos letras: la primera indica el tipo de semiconductor utilizado (A para germanio, B para silicio, C para otros semiconductores) y la segunda letra indica el tipo de dispositivo.

Tabla 5.5

AC	Transistor de germanio para pequeña señal.
AF	Transistor de germanio para radiofrecuencia.
BC	Transistor de silicio para pequeña señal (transistores de propósito general).
BD	Transistor de silicio para aplicaciones de potencia.
BF	Transistor de silicio para radiofrecuencia.
BS	Transistor de silicio para conmutación.
BL	Transistor de silicio para potencia y alta frecuencia.
BU	Transistor de silicio para alto voltaje.

Las características de un determinado modelo de transistor están recogidas en su hoja de características. Este documento lo proporciona el fabricante del transistor (por lo tanto, para los modelos usuales de transistores, manufacturados por varios fabricantes diferentes, podemos encontrar distintas hojas de datos, si bien los valores que indicarán serán muy similares, si no idénticos).

La estructura de las hojas de datos puede variar ligeramente, pero la práctica totalidad de ellas incluyen una visión general del componente, indicando sus terminales; las características mecánicas (dimensiones); y una serie de características eléctricas y limites máximos en que es capaz de soportar el componente sin sufrir daño. Estas características pueden darse en forma de tabla o en forma gráfica.

EJEMPLO 5.1

A continuación se resumen los valores principales que encontraremos en una hoja de datos de un transistor bipolar, junto con una explicación del parámetro y el valor típico para un transistor de propósito general BC107.

- Limites absolutos máximos:

Tabla 5.6

VCBO	Tensión máxima colector-base (IE = 0)	50 V
VCEO	Tensión máxima colector-emisor (IE = 0)	45 V
VEBO	Tensión máxima emisor-base (IE = 0)	6 V
IC	Corriente de colector	100 mA
Ptot	Potencia disipada Tamb < =25ºC Tcase <= 25ºC	0.3 W 0.75 W

- Características eléctricas:

Tabla 5.7

VBE(on)	Tensión de activación base-emisor	IC = 2 mA, VCE = 5 V	650 mV
		IC = 10 mA, VCE = 5 V	700 mV
HFE	Ganancia de corriente en continua (beta)	IC = 2 mA,VCE = 5 V	110
		IC = 10 uA,VCE = 5 V	120

5.1.5 TIPOS DE TRANSISTORES

Ahora que se conocen las características principales que definen el funcionamiento de un transistor, es posible establecer una clasificación a grandes rasgos de estos en función de la aplicación para la que han sido diseños. Para los circuitos de pequeño tamaño y complejidad moderada, es habitual utilizar los transistores de **propósito general**. El BC107 cuyos datos se resumieron en la sección anterior es un ejemplo de este tipo. Sus características los hace válidos par un gran rango de aplicaciones.

¿SABÍAS QUE...?

Si se necesita trabajar con valores altos de tensión y corriente, habrá que utilizar un **transistor de potencia**. Estos tiene máximos absolutos muy altos lo que permite utilizarlos en circuitos en que la sea necesaria una disipación importante sin temor a que resulten dañados.

¿SABÍAS QUE...?

Los **transistores de audio** se caracterizan por tener una muy baja figura de ruido y una gran linealidad, para evitar distorsiones no deseadas en la señal a amplificar. Los de **radiofrecuencia** pueden alcanzar frecuencias de funcionamiento muy elevadas (cientos de Mhz) sin que sus características se resientan, por lo cual son ideales en circuitos transmisores/receptores de comunicaciones.

¿SABÍAS QUE...?

Para controlar el encendido o apagado de un circuito utilizando una señal de control, se utilizan los **transistores de conmutación**, que debido a su gran ganancia en continua permiten un cambio rápido entre las zonas de corte y saturación.

ACTIVIDADES 5.2

- Diferentes aparatos que se utilizan en la vida cotidiana contienen distintos tipos de transistores. Así, una cadena de música tendrá transistores de audio, mientras que un teléfono móvil usará transistores de radiofrecuencia. Los aparatos digitales (cualquier ordenador, por ejemplo) utilizan sobre todo transistores de conmutación.
- Busque en las hojas de referencia (*datasheets*) de algún fabricante las características de un transistor de cada uno de los tipos descritos en el apartado 1.5 y compare los datos.

5.2 POLARIZACIÓN Y MODOS DE OPERACIÓN

En los ejemplos vistos hasta ahora, se ha supuesto siempre que los transistores operaban según lo que hemos llamado el "modo habitual", es decir, con la unión semiconductora emisor-base polarizada directamente y la unión base-colector polarizada inversamente. Si bien este es el caso más común, no es el único modo de funcionamiento de los transistores. En esta sección se profundiza en otros tipos de polarización y funcionamiento.

5.2.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS

Se denominan curvas características de un dispositivo a las gráficas que determinan su funcionamiento. Dada la complejidad de un transistor, existen muchas curvas diferentes en las hojas de datos que proporciona el fabricante, pero hay dos gráficas que ilustran de manera clara su comportamiento: la intensidad de base frente a la tensión *B-E*, y la intensidad de colector respecto a la tensión *C-E*.

La Figura 5.7 muestra la intensidad de base frente a la tensión base emisor, para un transistor NPN típico. Como puede observarse, la curva es prácticamente idéntica a la de un diodo semiconductor (lo cual es lógico ya que en ambos cases se trata de una unión PN). Para los transistores de silicio, la tensión umbral está en torno a 0.7 V, con lo cual para obtener el punto de polarización del transistor normalmente asumiremos V_{BE} = 0.7 V. Para valores inferiores a la tensión umbral, la corriente que circula por la base es prácticamente nula, y el transistor está en la **región de corte**, en la cual no permite el paso de corriente entre el colector y el emisor.

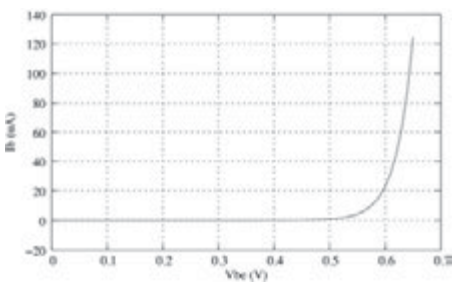


Figura 5.7. *Curva característica del BC107*

En la Figura 5.8 vemos la intensidad de colector en función de la tensión entre el colector y el emisor, para diferentes valores de la intensidad de base. También en esta gráfica es posible identificar la zona de corte, ya que para valores cercanos al cero de I_B (como corresponde a V_{BE} menores de 0.7 V) vemos que apenas circula corriente por el colector o el emisor, sea cual sea V_{CE}. El modo habitual de funcionamiento, sitúa al transistor en la **región activa**, en la cual la corriente de colector es prácticamente constante para cualquier V_{CE} (e igual a la corriente de base multiplicada por la ganancia en corriente beta). Si reducimos V_{CE}, llega un momento en que la unión CB pasa a estar directamente polarizada y el transistor entra en la **región de saturación**. En este modo de funcionamiento, normalmente se asume una tensión de colector-emisor (V_{CESAT}) de 0,2 V.

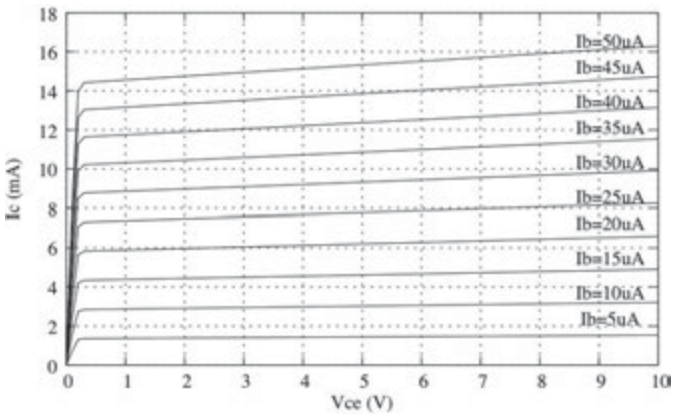


Figura 5.8. *Curva característica del BC107*

Tabla 5.8

	Unión B-E	Unión C-B
Activa	Directa	Inversa
Saturación	Directa	Directa
Corte	Inversa	Inversa

¿SABÍAS QUE...?

En inglés se dice:
- Transistor: *transistor*.
- Transistor bipolar: *bipolar transistor*.
- Transistor de silicio: *silicon transistor*.
- Fototransistor: *phototransistor*.
- Fuente: *source*.

5.2.2 RESOLUCIÓN GRÁFICA DE PROBLEMAS

Si se dispone de las curvas características de un transistor, se puede obtener su **punto de polarización** con gran exactitud utilizando un método gráfico. Las curvas características determinan las condiciones de tensión/intensidad en las cuales puede funcionar el transistor, por lo cual si obtenemos curvas similares para el resto de los componentes, la intersección de las curvas nos dará el punto en el que todos ellos satisfacen sus condiciones de funcionamiento.

EJEMPLO 5.2

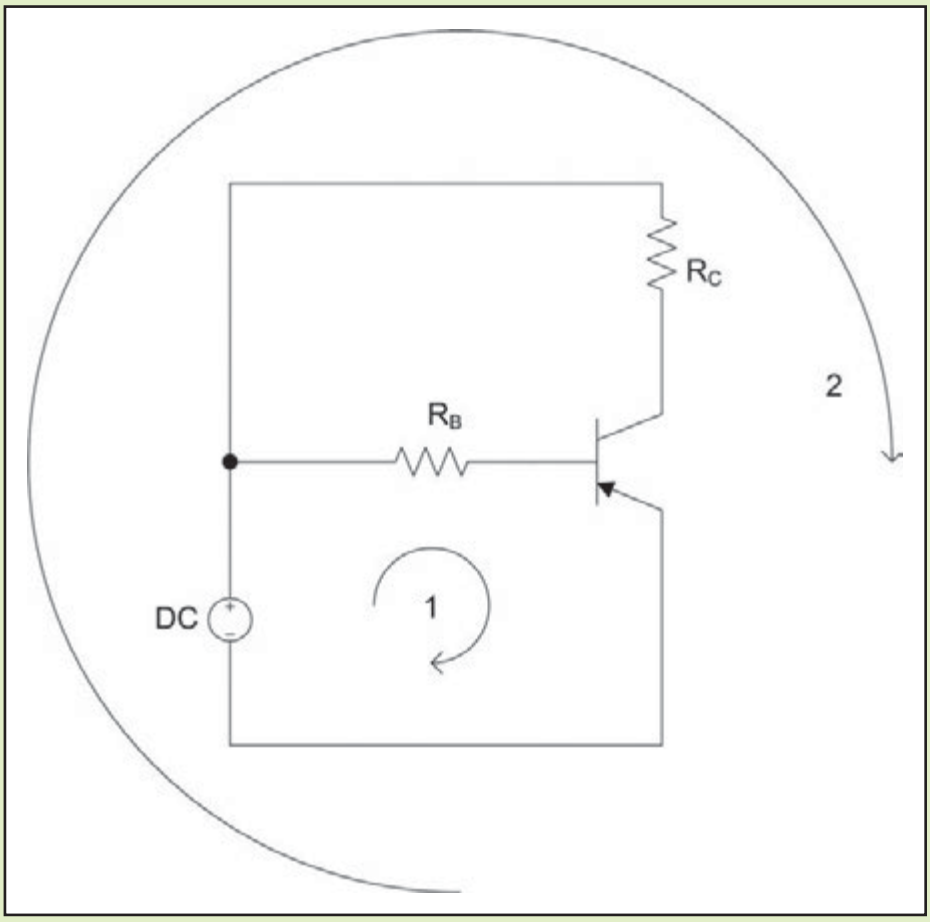


Figura 5.9. *Circuito de polarización sencillo*

En el esquemático de ejemplo (Figura 5.9), se tiene un circuito de polarización sencillo. Las curvas características del transistor son iguales a las vistas en la sección anterior. En primer lugar realizamos un análisis de las dos mallas del esquemático:

$$V_{CC} = I_B \cdot R_B + V_{BE} \Rightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{5 - V_{BE}}{10^5}$$

$$V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_{CE} \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} = \frac{5 - V_{CE}}{10^3}$$

La malla número 1 proporciona la relación V_{BE}/I_B forzada por los componentes de polarización, externos al transistor (en este caso, la resistencia R_B). Puede observarse que se trata de una relación lineal. Al dibujarla sobre la curva característica de la unión BE del transistor (Figura 5.10), se obtiene de manera exacta el punto de polarización base-emisor en el que esta trabajando el circuito.

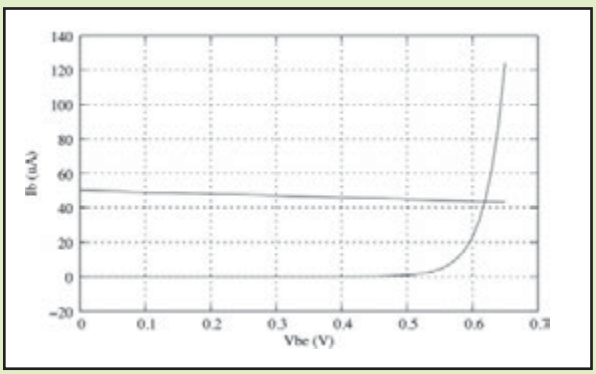


Figura 5.10. *Resolución gráfica del circuito de la Figura 5.9 sobre la curva*

Con el valor de IB así obtenido, se puede, por un lado, eliminar la dependencia con IB de la expresión obtenida de la malla número 2 y, por otro lado, seleccionar la curva correcta de la gráfica V_{CE}/I_C, correspondiente al valor de I_B en que estará trabajando el transistor. Realizando la misma operación (Figura 5.11) se obtienen los valores de I_C y V_{CE}, con lo cual se conoce de manera completa el punto de trabajo del componente.

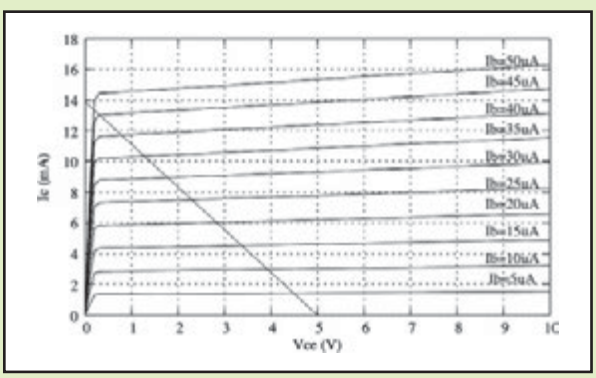


Figura 5.11*. Resolución gráfica del circuito de la Figura 5.9 sobre la curva*

En casos sencillos como el ejemplo anterior, la relación V_{BE}/I_B tiene un factor de proporcionalidad independiente del punto de polarización, lo cual permite establecer el punto de funcionamiento en la curva correspondiente a la unión BE directamente. Sin embargo, en la mayoría de los casos, incluido el ejemplo que se estudiará a continuación (Figura 5.12), hay una dependencia con algún otro valor del punto de operación, con lo cual se ha de comenzar el análisis gráfico por la otra curva característica, la que muestra V_{CE}/I_C para diferentes valores de I_B.

EJEMPLO 5.3

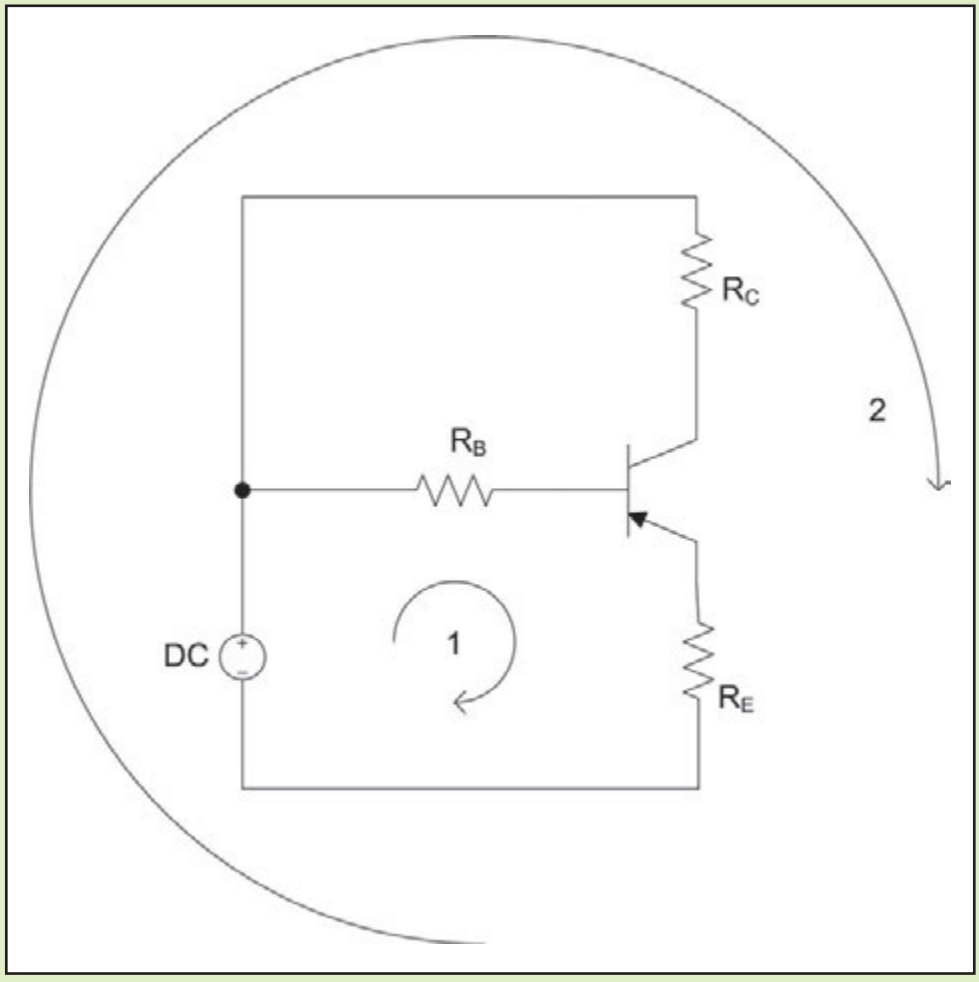


Figura 5.12. *Circuito de polarización con resistencia de emisor*

Al igual que en el ejemplo anterior, un análisis de malla proporciona las condiciones establecidas por las resistencias de polarización. Se puede observar que, efectivamente, la relación V_{BE}/I_B depende de la I_C en el punto de trabajo.

$$V_{CC} = I_B \cdot R_B + V_{BE} + I_E \cdot R_E \Rightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE} - I_C \cdot R_E}{R_B + R_E}$$

$$V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_{CE} + I_E \cdot R_E \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE} - I_B \cdot R_E}{R_C + R_E}$$

En la otra curva aparecen graficados las rectas determinadas por la ecuación de la malla 2 para 5 posibles valores de I_B, aunque las rectas están tan juntas que en realidad aparecen como una sola. Al buscar los puntos de intersección correspondientes (para los diferentes valores de I_B), se obtienen 5 posibles puntos de trabajo, con I_C y V_{CE} para cada uno de ellos.

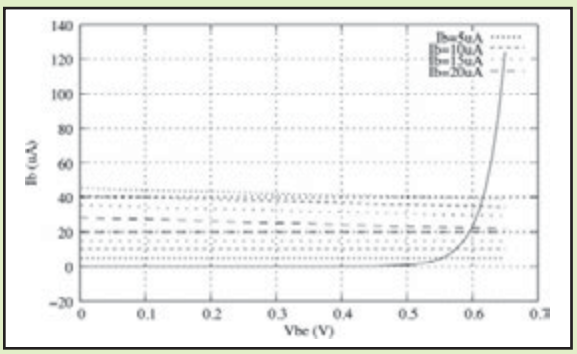


Figura 5.13. *Resolución gráfica del circuito de la Figura 5.12 sobre la curva*

Tabla 5.9

IB (μA)	VCE (V)	IC (mA)
5	4	1,25
10	2,75	2,5
15	1,5	4
20	0,3	6
25	X	X

Una vez extraídos estos valores, es posible ir a la curva V_{BE}/I_B y trazar las cinco rectas de polarización en esos terminales. Cada punto de trabajo en la curva V_{CE}/I_C corresponde a otro en la curva V_{BE}/I_B. Ahora bien, ¿cuál es el correcto? Para desambiguarlos se trazan las líneas horizontales determinadas por el valor de I_B en la curva base-emisor. El punto de trabajo que más cercano a la correspondiente horizontal de I_B constante será el correcto.

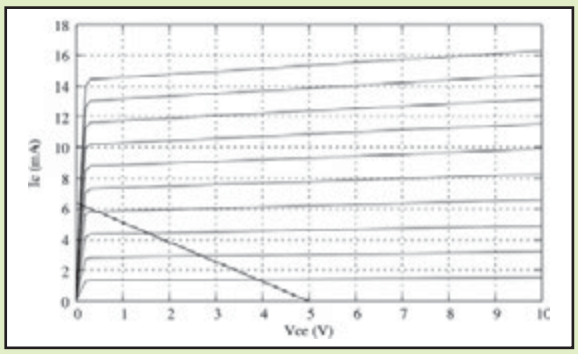


Figura 5.14. *Resolución gráfica del circuito de la Figura 5.12 sobre la curva*

El punto de polarización obtenido finalmente es:

$$I_B = 20\mu A$$
$$V_{CE} = 0{,}3V$$
$$I_C = 6mA$$

5.2.3 MODELO EQUIVALENTE EN CC

La obtención del punto de polarización mediante métodos gráficos puede no ser conveniente en todos los cases. En ocasiones no se dispondrá de las curvas adecuadas, o éstas no tendrán la suficiente precisión. Por otro lado, una vez dominado, el método analítico de resolución permite obtener el punto de trabajo con mayor facilidad y en menor tiempo.

Para estudiar de forma analítica circuitos con transistores, se utilizan modelos de componentes ideales cuya composición se comporta como el transistor modelado. Dado que los transistores bipolares tienen como ya se ha visto tres zonas de operación, entre las cuales su comportamiento difiere enormemente, el proceso de análisis comienza con la hipótesis de que el transistor se encuentra en la zona activa. Las condiciones para ello son:

$$\left.\begin{array}{l} V_{BE} \geq 0{,}7V \\ V_{CB} \geq 0V \end{array}\right\} \text{(para NPN)} \qquad \left.\begin{array}{l} V_{BE} \leq -0{,}7V \\ V_{CB} \leq 0V \end{array}\right\} \text{(para PNP)}$$

y el modelo equivalente del transistor en este modo de funcionamiento es:

$$\left.\begin{array}{l} V_{BE} = 0{,}7V \\ I_C = \beta \cdot I_B \end{array}\right\} \text{(NPN)} \qquad \left.\begin{array}{l} V_{BE} = -0{,}7V \\ I_C = \beta \cdot I_B \end{array}\right\} \text{(PNP)}$$

5.2.3.1 Ejemplo de análisis NPN

EJEMPLO 5.4

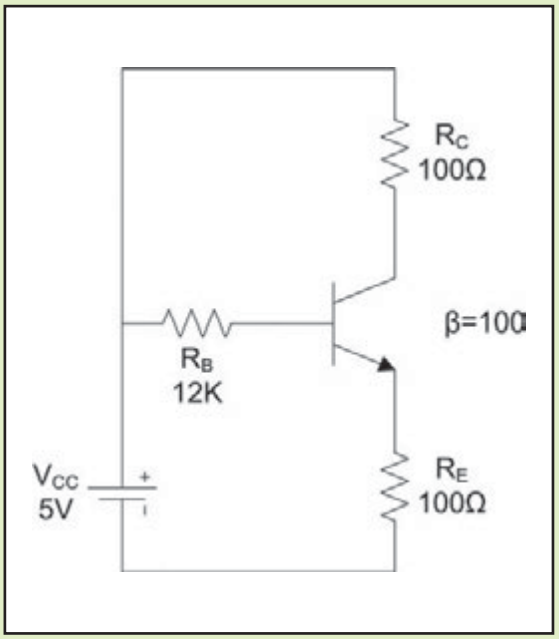


***Figura 5.15**. Ejemplo de polarización de un transistor NPN*

Dado un circuito como el mostrado en la Figura 5.15, se realiza un análisis de mallas.

$$V_{CC} = I_B \cdot R_B + V_{BE} + I_E \cdot R_E$$

$$V_{CB} = -I_C \cdot R_C + I_B \cdot R_B$$

Se asume que el transistor está polarizado en la zona activa, de modo que $I_C = \beta \cdot I_B$, y la ecuación de la malla 1 puede resolverse:

$$V_{CC} = I_B \cdot R_B + V_{BE} + (I_C + I_B) \cdot R_E \Rightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E}$$

y utilizando los valores numéricos del esquemático:

$$\left.\begin{array}{r} V_{CC} = 5V \\ V_{BE} = 0{,}7V \\ \beta = 100 \\ R_B = 12K \\ R_E = 100\Omega \end{array}\right\} \Rightarrow I_B = 195\mu A$$

Operando y sustituyendo ahora en la ecuación de la malla 2:

$$V_{CB} = I_B \cdot \left(R_B - \beta \cdot R_C\right) = 0{,}389V$$

Se cumplen las condiciones de zona activa, luego el análisis es correcto. El punto de polarización completo es:

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} = 1{,}089V$$
$$I_C = \beta \cdot I_B = 19{,}457mA$$

y la potencia disipada en el transistor: $P = V_{CE} \cdot I_C$ = 21 mW.

5.2.3.2 Ejemplo de análisis PNP

EJEMPLO 5.5

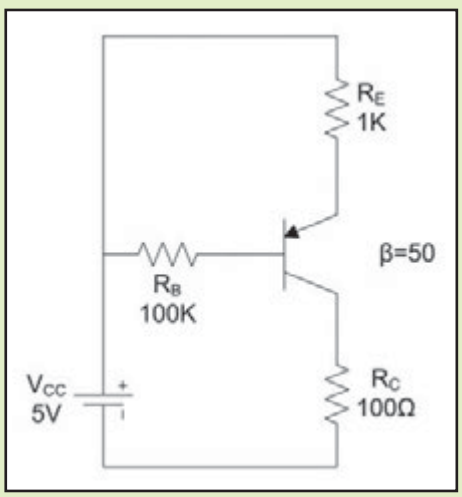


Figura 5.16. *Ejemplo de polarización de un transistor PNP*

La Figura 5.16 muestra un esquemático de un transistor PNP polarizado. Como siempre, hay que comenzar realizando un análisis de mallas:

$$V_{CC} = I_E \cdot R_E - V_{BE} + I_B \cdot R_B$$

$$V_{CB} + I_B \cdot R_B - I_C \cdot R_C = 0$$

Se asume zona activa y se opera sobre la igualdad de la malla 1:

$$I_B \cdot \left(R_B + (\beta + 1) \cdot R_E\right) = V_{CC} + V_{BE} \Rightarrow I_B = \frac{V_{CC} + V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E}$$

para los datos del ejemplo:

$$\left.\begin{array}{r} V_{CC} = 5V \\ V_{BE} = -0{,}7V \\ \beta = 50 \\ R_B = 100K \\ R_E = 1K \end{array}\right\} \Rightarrow I_B = 28{,}477\,\mu A$$

Sustituyendo en la malla 2:

$$V_{CB} = I_C \cdot R_C - I_B \cdot R_B = I_B \cdot \left(\beta \cdot R_C - R_B\right) = -2{,}705V$$

Se cumplen de nuevo las condiciones para que el transistor opere en zona activa. Los valores del punto de polarización son:

$$\begin{aligned} V_{CE} &= V_{CB} + V_{BE} = -3{,}405V \\ I_C &= \beta \cdot I_B = 1{,}424mA \\ P &= \left|V_{CE} \cdot I_C\right| = 4{,}848mW \end{aligned}$$

Si una vez obtenido el punto de polarización, no se cumpliesen las condiciones de la zona activa, habrá que realizar los análisis correspondientes con los modelos equivalentes para los modos de corte y saturación. En estas zonas de polarización el transistor funciona como un interruptor o conmutador, como se verá en el siguiente apartado.

5.2.4 CONMUTACIÓN

Si se trata de forzar al transistor a trabajar con una corriente de colector mayor de la que el circuito de polarización puede proporcionar, entrará en saturación. Se puede calcular la I_B máxima para la zona activa suponiendo que $V_{CB} = 0$.

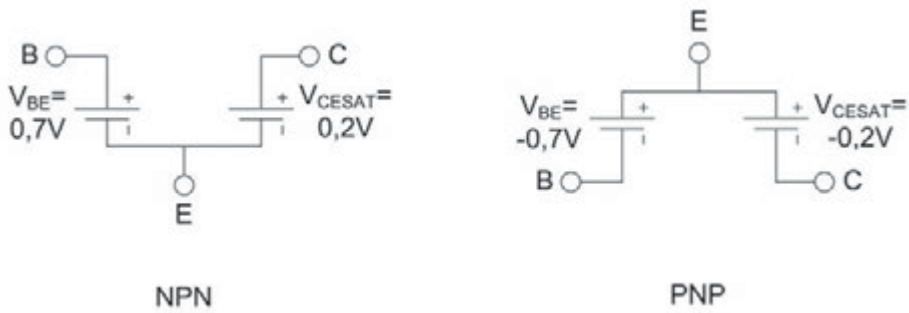


Figura 5.17. *Modelos equivalentes en continua de u transistor bipolar en zona de saturación*

Para I_B superiores a esa $\hat{I}_B$, la corriente de colector no puede seguir aumentando para cumplir la igualdad $I_C = \beta \cdot I_B$, y el transistor estará saturado. Los circuitos equivalentes en saturación para los transistores NPN y PNP son los que se muestran en la Figura 5.17. Cuando la tensión de alimentación del circuito de polarización es mucho mayor que las diferencias de potencial es las uniones BE y BC, el circuito equivalente puede simplificarse aún más (Figura 5.18).

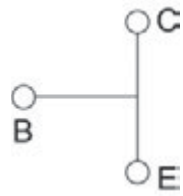


Figura 5.18. *Modelo equivalente en saturación simplificado*

EJEMPLO 5.6

En el ejemplo NPN anterior (Figura 5.15), si se hace disminuir la resistencia R_B, la I_B aumentará hasta que el transistor entre en saturación. La R_B mínima será:

$$V_{CB} = I_B \cdot (R_B - \beta \cdot R_C) = 0 \Rightarrow R_B = \beta \cdot R_C = 10K$$

Se modifica el circuito para reemplazar la resistencia de base por una menor de 10 K (Figura 5.19), y se aplican las ecuaciones del ejemplo, sustituyendo los nuevos datos numéricos.

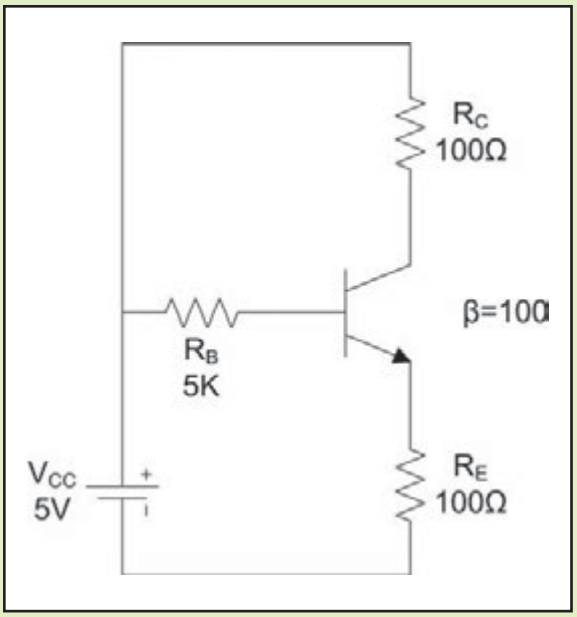


Figura 5.19. *Ejemplo de polarización en zona de saturación*

$$\left.\begin{array}{r} V_{CC} = 5V \\ V_{BE} = 0{,}7V \\ \beta = 100 \\ R_B = 5K \\ R_E = 100\Omega \end{array}\right\} \Rightarrow I_B = 284{,}768\mu A$$

$$V_{CB} = I_B \cdot \left(R_B - \beta \cdot R_C\right) = -0{,}475$$

Luego $V_{CB} < 0$ y la suposición de zona activa era incorrecta. Utilizamos por tanto el modelo de saturación y reanalizamos utilizando V_{CESAT}. El análisis de la malla 2 no cambia por lo cual la I_B calculada es correcta.

$$V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_{CESAT} + I_E \cdot R_E = I_C \cdot R_C + V_{CESAT} + \left(I_C + I_B\right) \cdot R_E$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CESAT} - I_B \cdot R_E}{R_C + R_E} = 23{,}858mA$$

$$P = V_{CESAT} \cdot I_C = 4{,}771mW$$

La última zona de trabajo del transistor, la zona de corte, se aplica cuando no es posible mantener V_{BE} = 0,7 V, por ejemplo disminuyendo la tensión de alimentación en el circuito analizado. En la región de corte, el modelo equivalente es el de un circuito abierto en los tres terminales: $I_B = I_E = I_C = 0$.

Estos dos modos de trabajo permiten utilizar el transistor como un conmutador. En muchas ocasiones es necesario controlar la alimentación de un determinado circuito sin que el la corriente que dicho circuito atraviese interruptor que lo controla; esto puede deberse a limitaciones en la intensidad que puede atravesar el interruptor, por razones de fabricación. En casos como éste, es posible utilizar un montaje como el mostrado en la Figura 5.20.

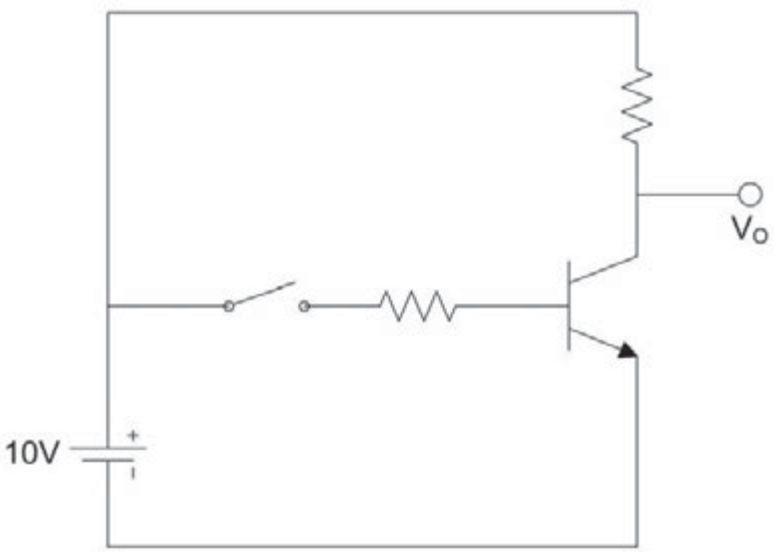


Figura 5.20. *Uso de un transistor como conmutador*

Si el interruptor está cerrado, el transistor estará en saturación (asumiendo valores apropiados de las resistencias de polarización), y en ese caso: $V_0 = V_{CESAT} \approx 0{,}2$ V, dejando de alimentar cualquier circuito conectado a V_0. Por otro lado, si se abre el interruptor el transistor entrará en la zona de corte, con lo cual: $I_C = 0 \rightarrow V_0 = 10$ V.

5.3 AMPLIFICACIÓN CON TRANSISTORES

Hasta ahora se ha estudiado el comportamiento de los transistores bipolares en continua. Sin embargo, su aplicación principal (la amplificación) tiene lugar en el dominio de la corriente alterna, siendo el análisis en DC útil únicamente para extraer el punto de polarización. Una vez conocido este punto de polarización, se reemplaza el transistor por el llamado **modelo de pequeña señal**, válido únicamente para unos valores de tensión e intensidad en un entorno del punto de operación.

5.3.1 MODELO DE PEQUEÑA SEÑAL DEL TRANSISTOR

Las señales de tensión que alimentarán en las aplicaciones reales los circuitos a transistor tienen el aspecto de la Figura 5.21. Estas señales pueden ser descompuestas en una tensión continua y una tensión alterna, la suma de las cuales formará la tensión final. Es importante aclarar que esta descomposición ha de hacerse de forma que la tensión alterna sea pura, es decir, centrada en torno a cero, para que no exista ninguna componente continua en la señal alterna.

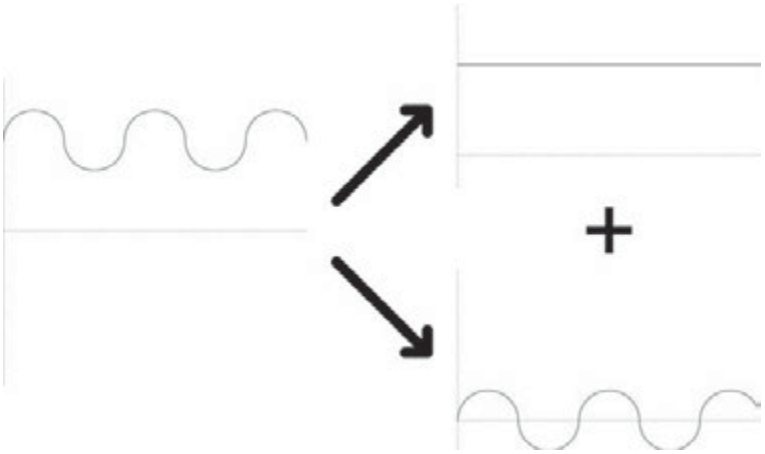


Figura 5.21. *Descomposición de una señal eléctrica en sus componentes en corriente continua y corriente alterna*

En la gran mayoría de los casos, la amplitud de la señal alterna es mucho menor que la magnitud de la señal continua, por lo que el circuito va a estar funcionando en pequeñas oscilaciones en un entorno del punto de oscilación. En este tipo de situaciones los circuitos se analizarán en dos pasos:

1. **Análisis en DC**: se anulan las fuentes de alterna y se obtiene el punto de polarización de los transistores.
2. **Análisis en AC**: se anulan las fuentes de continua y se analiza el circuito utilizando el modelo de pequeña señal de los transistores.

Para anular las fuentes de continua, se hace que su valor sea igual a cero. De este modo, las fuentes de tensión se convierten en cortocircuitos (V = 0) mientras que las de intensidad se convierten en circuitos abiertos (I = 0).

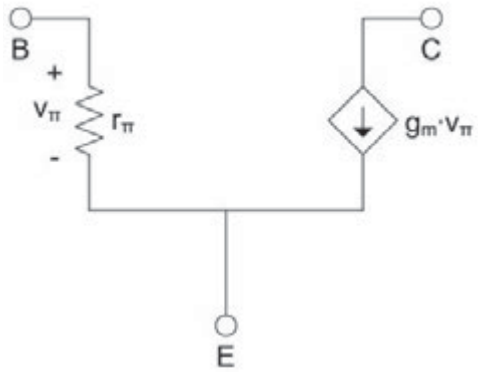


Figura 5.22. *Modelo equivalente de un transistor bipolar en pequeña señal*

El modelo de pequeña señal más utilizado para los transistores bipolares es el mostrado en la Figura 5.22. Se compone de una resistencia, que modela la impedancia de entrada base-emisor, y una fuente de intensidad controlada, cuya magnitud depende de la tensión que caiga en la mencionada resistencia. Tanto el valor de la resistencia de emisor r_π como de la transconductancia g_m dependen del punto de polarización, de ahí que sea necesario realizar un análisis en continua antes de proceder al análisis en pequeña señal. Aunque varían para cada transistor concreto, podemos aproximar su valor como:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \qquad\qquad r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

donde V_T es el voltaje térmico, que es aproximadamente igual a 25 mV a temperatura ambiente. Este modelo es el mismo tanto para transistores NPN como PNP.

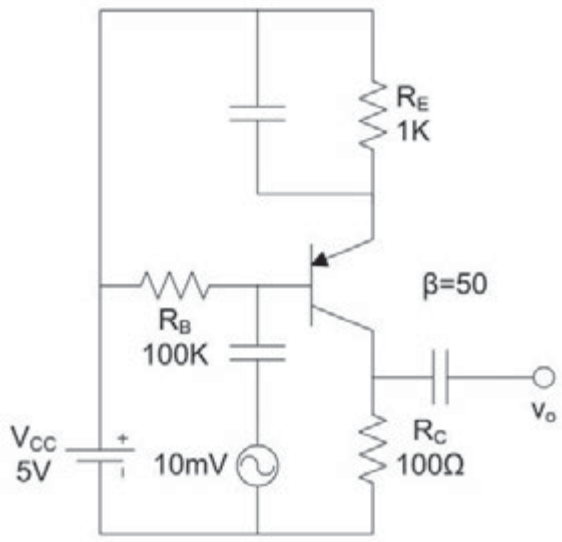


Figura 5.23. *Transistor PNP polarizado al que se le aplica una señal alterna de pequeña magnitud*

Considérese el circuito de la Figura 5.23, en el que al transistor PNP cuyo punto de polarización se extrajo anteriormente se le han añadido unos condensadores de desacoplo y una fuente de señal alterna. Los condensadores se considerarán ideales, es decir, circuitos abiertos para el análisis en DC y cortocircuitos para AC. El análisis en continua es idéntico al realizado anteriormente, por lo que se conoce ya el punto de polarización y es posible hallar los parámetros del modelo en pequeña señal.

$$I_C = 1{,}424mA \Rightarrow \begin{cases} g_m = \dfrac{I_C}{V_T} = \dfrac{1{,}424mA}{25mV} = 0{,}057\,A/V \\ r_\pi = \dfrac{\beta}{g_m} = \dfrac{50}{0{,}057} = 878\Omega \end{cases}$$

A continuación se realiza el análisis en señal alterna, sustituyendo el transistor por el modelo equivalente, los condensadores por cortocircuitos y anulando la fuente de continua, como aparece en la Figura 5.24.

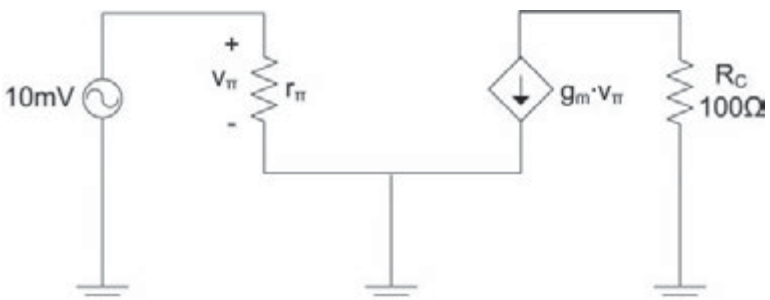


Figura 5.24. *Análisis en pequeña señal del circuito de la Figura 5.23*

$$v_o = -g_m \cdot v_\pi \cdot R_C = -g_m \cdot v_i \cdot R_C = 5{,}7 \cdot v_i$$

Es decir que la señal de entrada v_i será amplificada 5,7 veces. Hay que tener en cuenta que la señal alterna debe ser pequeña en relación con la alimentación de DC, puesto que de otro modo estaría modificando el punto de polarización y el modelo equivalente no será válido. El ejemplo introduce un señal de entrada de 10 mV (10 mV << 5 V, con lo cual el modelo en pequeña señal es válido) resultando en: $v_0 = 5{,}7 \cdot v_i = 5{,}7 \cdot 10$ mV = 57 mV.

5.3.2 CONFIGURACIONES DE ETAPA SIMPLE

Se introducen aquí las tres configuraciones básicas de amplificadores a transistor bipolar: **emisor común** (EC), **base común** (BC) y **colector común** (CC). El nombre de cada configuración viene dado por el terminal que es compartido entre las señales de entrada salida, como se muestra en la siguiente tabla:

5.3.2.1 Amplificador en emisor común

Esta configuración proporciona unas altas ganancias y una salida invertida con respecto a la señal de entrada. El esquema de un amplificador en emisor común típico aparece en la Figura 5.25, donde se han utilizado condensadores

para aislar este circuito de polarización de la fuente de alterna. Estos condensadores se considerarán ideales, por lo tanto se comportarán como circuitos abiertos en corriente continua, y como cortocircuitos durante el análisis en pequeña señal.

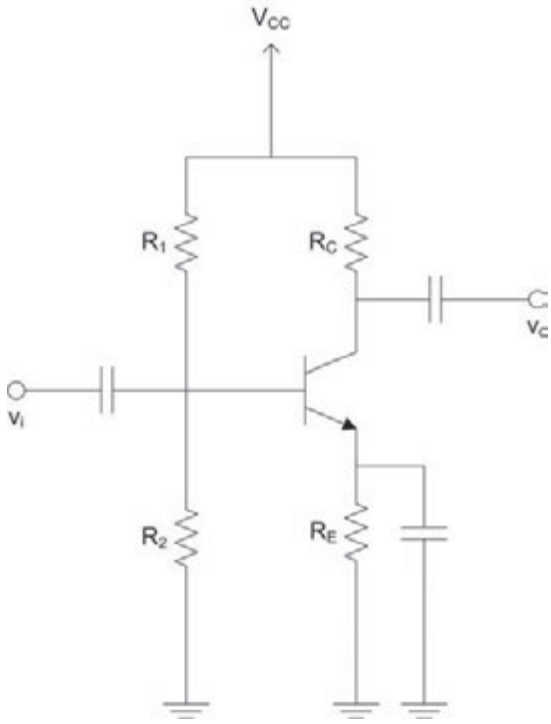


Figura 5.25. *Amplificador en emisor común*

Tabla 5.10

Configuración	Entrada	Salida
Emisor común (EC)	Base-Emisor	Colector-Emisor
Base común (BC)	Emisor-Base	Colector-Base
Colector común (CC)	Base-Colector	Emisor-Colector

Como aparecía en la tabla anterior, puede observarse que la entrada de señal se realiza entre la base y el emisor, y la salida entre el colector y el emisor.

¿SABÍAS QUE...?

La ganancia en tensión de los amplificadores en emisor común viene dada por la ecuación:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m \cdot R_C \cdot$$

5.3.2.2 Amplificador en base común

Este tipo de configuraciones tienen una ganancia en tensión también elevada, pero se diferencian de los amplificadores en emisor común por su baja ganancia en intensidad (cercana a la unidad). La Figura 5.26 muestra un esquemático de esta configuración:

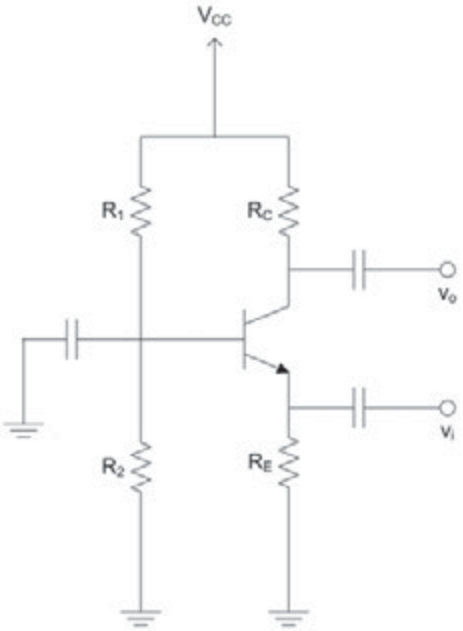


Figura 5.26. *Amplificador en base común*

¿SABÍAS QUE...?

La ganancia en tensión de los amplificadores en base común viene dada por:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = g_m \cdot R_C \cdot$$

5.3.2.3 Amplificador en colector común (o seguidor de emisor)

El amplificador en colector común, un ejemplo del cual se ve en la Figura 5.27, tiene una ganancia en tensión cercana a la unidad. Esto quiere decir que u terminal de salida (el emisor) tendrá prácticamente el mismo nivel de tensión que su terminal de entrada (la base); es por esta razón que a esta configuración se le denomina también **seguidor de emisor**.

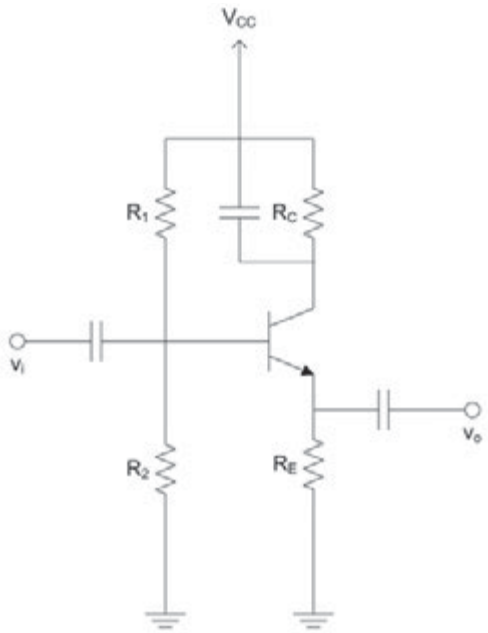


Figura 5.27. *Amplificador en colector común*

¿SABÍAS QUE...?

La ecuación característica del Amplificador en Colector común es:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx 1 .$$

5.3.2.4 AMPLIFICADORES EN CASCADA

En ocasiones es necesario obtener mayores valores de ganancia de los que son alcanzables con alguna de las tres configuraciones vistas anteriormente. En ese caso se pueden utilizar asociaciones de transistores, en las que la salida de una etapa es la entrada de la siguiente. En la Figura 5.28 puede verse un circuito con dos etapas en emisor común conectadas en cascada.

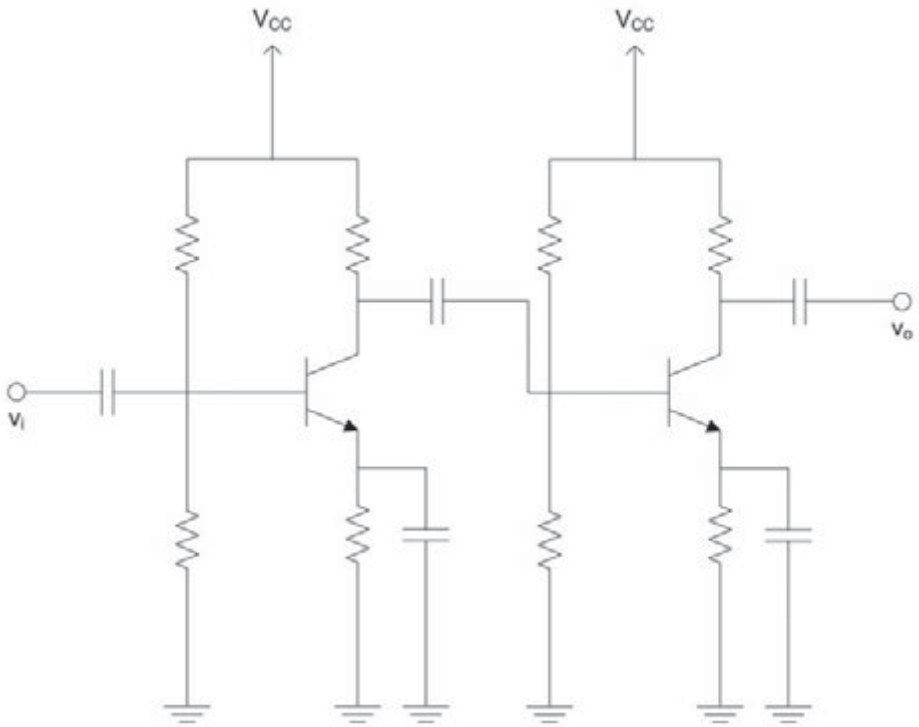


Figura 5.28. *Dos amplificadores en emisor común conectados en cascada*

¿SABÍAS QUE...?

Como primera aproximación del amplificador en cascada se pueden analizar las etapas por separado y asumir que: $A_v = \frac{v_o}{v_i} = A_{v1} \cdot A_{v2}$, donde A_{v1} y A_{v2} es la ganancia en tensión de cada una de las etapas, respectivamente.

ACTIVIDADES 5.3

- Obtenga las curvas características de un transistor NPN y otro PNP de sus hojas de datos. ¿Se le ocurre algún otro modo de obtener estas curvas?
- Realice un análisis en pequeña señal de los circuitos de ejemplo para los amplificadores en emisor común y en base común y compruebe que los resultados coinciden con las fórmulas dadas.

5.4 CASO PRÁCTICO

Para familiarizarse con los transistores reales, se ejercitará un método de identificación de los terminales mediante el polímetro. Esto puede ser muy útil en la práctica ya que permite saber de manera sencilla y sin posibilidad de error:

- ✓ Tipo de transistor bipolar (NPN o PNP).
- ✓ Cuál de los 3 terminales es la base.
- ✓ Conocida la base, permite identificar también colector y emisor.

Para ello, se coloca el polímetro en el modo de medición de resistencias, y se procede a medir la resistencia entre todos los pares de terminales, en ambos sentidos (es decir, dos mediciones en cada par de terminales, intercambiando las sondas roja y negra del polímetro en cada caso). Hay que tener en cuenta que la resistencia de una unión semiconductora polarizada inversamente es muy elevada (idealmente un cortocircuito), mientras que una unión directamente polarizada presenta una baja resistencia. Esto se resume en la siguiente tabla:

Tabla 5.11

Punta roja	Punta negra	PNP	NPN
Colector	Emisor	Alta resistencia	Alta resistencia
Emisor	Colector	Alta resistencia	Alta resistencia
Emisor	Base	Baja resistencia	Alta resistencia
Base	Emisor	Alta resistencia	Baja resistencia
Base	Colector	Alta resistencia	Baja resistencia
Colector	Base	Baja resistencia	Alta resistencia

Comparando las medidas tomadas con la Tabla 5.11, se puede identificar el tipo de transistor, así como el terminal base. Una vez conseguido esto, podemos identificar los otros dos terminales sabiendo que *la resistencia de la unión base-colector es inferior a la de la unión base-emisor* (aunque la diferencia no es demasiado elevada).

Para ejercitar esta técnica, lo ideal es repetir el experimento con diferentes transistores y, posteriormente, consultar sus hojas de datos para comprobar si la identificación del tipo y de los distintos terminales se realizó correctamente.

RESUMEN DEL CAPÍTULO

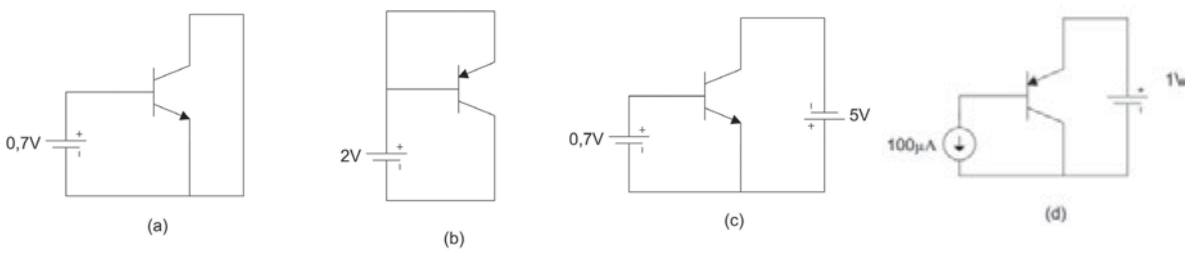
Los transistores son dispositivos de importancia capital en el diseño de circuitos electrónicos. Dependiendo el modo en que se utilicen, permiten amplificar, reducir o invertir una determinada señal eléctrica, o controlar un determinado circuito actuando como conmutadores.

En este capítulo se han presentado los transistores desde un punto de vista de la física de semiconductores, para posteriormente pasar a la aplicación práctica de su uso, haciendo hecho hincapié en su uso como amplificadores, que es con mucho su aplicación más frecuente.

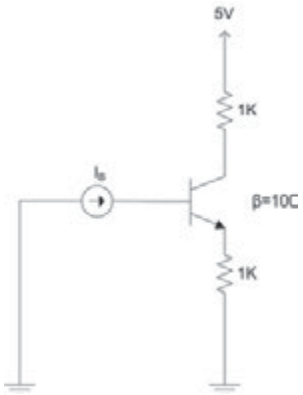
Así mismo, con objeto de posibilitar el estudio de los circuitos a transistor, se ha introducido el método del análisis en pequeña señal, que permite dividir el proceso de análisis de cualquier esquemático en un primer paso en que se determina el punto de polarización de los componentes activos (transistores en este caso) y un segundo paso donde se obtienen las relaciones de señal (ganancias e impedancias). Este método de análisis permite resolver con éxito circuitos a transistor de complejidad moderada.

EJERCICIOS PROPUESTOS

1. Determine la zona de operación para cada uno de los siguientes transistores:



2. Para el siguiente circuito:

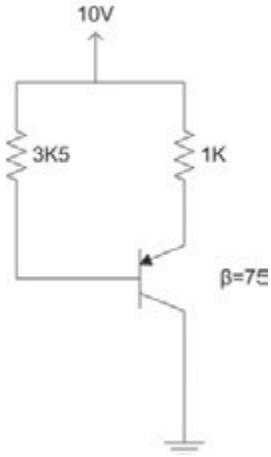


Determine el rango de valores de I_B para los cuales el transistor esta polarizado en su zona activa.

3. Utilizando las curvas características del BC107, obtenga la polarización del transistor del ejercicio anterior para:

- $I_B = 10$ µA
- $I_B = 20$ µA
- $I_B = 30$ µA
- $I_B = 40$ µA

4. Realice un análisis en DC del circuito siguiente, calculando la potencia disipada en cada una de las resistencias y en el transistor:

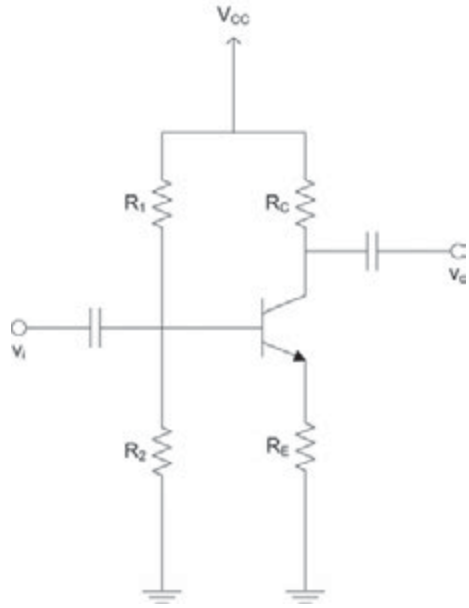


5. Un transistor NPN con β = 130 está polarizado de forma que la corriente de colector en continua es de 1,5 mA. Obtenga los valores de g_m y r_π. Repita para $I_C = 150$ µA.

6. Utilizando los esquemas modelo de los amplificadores a transistor de una sola etapa, diseñe diseñe un amplificador con $|A_v| = 2$, justificando sus decisiones de diseño, justificando sus decisiones de diseño.

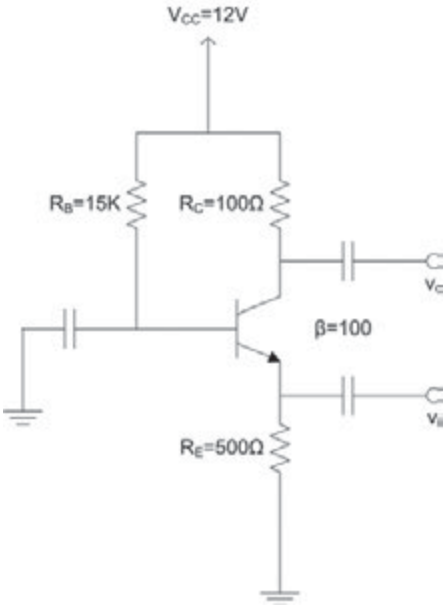
- $|A_v| = 2$.
- $A_v = 1$.
- $|A_j| \geq 5$.
- $A_j = 1$.

7. En la figura se muestra un amplificador en emisor común en el que se ha eliminado el condensador de desacoplo en la resistencia de emisor. Calcule las expresiones de las ganancias en tensión e intensidad y compárelas con las estudiadas anteriormente. ¿Qué opción le parece más eficiente?

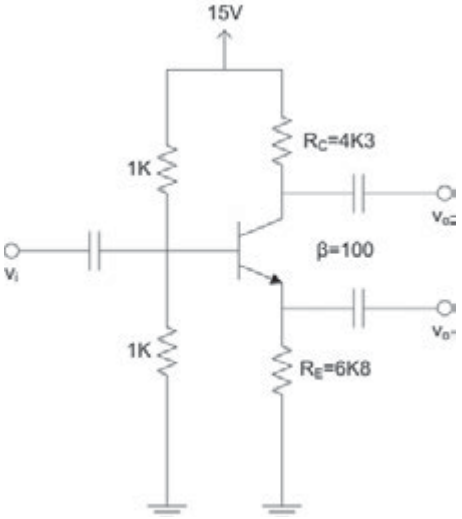


8. Realice un análisis completo del amplificador de la figura, obteniendo:

- Punto de polarización.
- Potencia disipada en el transistor.
- Ganancia en tensión e intensidad.



9. La figura muestra un circuito a transistor con una entrada de señal y dos salidas. Obtenga expresiones para las relaciones $A_{v1}=\frac{v_{o1}}{v_i}$ y $A_{v2}=\frac{v_{o2}}{v_i}$.



TEST DE CONOCIMIENTOS

1 Cuando un transistor bipolar tiene su unión BE polarizada directamente y su unión BC polarizada inversamente, ¿en qué zona de funcionamiento se encuentra?
- a) Corte.
- b) Activa.
- c) Saturación.
- d) Ninguna de las anteriores.

2 Si un transistor bipolar tiene ambas uniones directamente polarizadas, se encuentra en:
- a) Zona activa.
- b) Zona de saturación.
- c) Zona de corte.
- d) Ninguna de las anteriores.

3 ¿Y si tuviera ambas uniones semiconductoras inversamente polarizadas?
- a) Activa.
- b) Corte.
- c) Saturación.
- d) Ninguna de las anteriores.

4 Los transistores para los que, en zona activa, se asumen las condiciones V_{BE} = -0,7 V y $I_C = \beta \cdot I$ se denominan:
- a) NPN.
- b) NNP.
- c) PNP.
- d) PNN.

5 Para utilizar un transistor bipolar como conmutador, se utilizan sus zonas de trabajo:
- a) Corte y activa.
- b) Activa y saturación.
- c) Corte y saturación.
- d) Otras.

6 Si se desea un amplificador a transistor bipolar con una alta ganancia en tensión, ¿qué configuración es más apropiada?
- a) Colector común.
- b) Emisor común.
- c) Seguidor de emisor.
- d) En cascada.

7 Si a un transistor NPN que esta polarizado en la zona activa le aumentamos la corriente de base, ¿qué ocurrirá?
- a) Su corriente de colector disminuirá.
- b) Su corriente de emisor permanecerá constante.
- c) Su corriente de colector aumentará, hasta que se alcance la zona de corte.
- d) Su corriente de colector aumentará, hasta que se alcance la zona de saturación.

8 ¿Cuándo se puede aplicar el modelo equivalente del transistor en pequeña señal?
- a) Cuando esté polarizado en zona de corte y la señal alterna sea pequeña comparada con la tensión de polarización.
- b) Cuando el transistor esté polarizado en zona activa y la señal alterna sea significativa comparada con las tensiones del circuito.
- c) Siempre que el transistor esté en zona activa.
- d) Para señales alternas de pequeña amplitud, cuando el transistor esté polarizado en zona activa.

6 Fuentes de alimentación

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- ✓ Asimilar el concepto de la fuente de alimentación como generador de potencia.
- ✓ Conocer y diferenciar los tipos de fuentes de corriente continua.
- ✓ Comprender la función de cada etapa de una fuente de alimentación.

Todos los dispositivos electrónicos vistos en los capítulos anteriores necesitan estar alimentados para funcionar. Tanto los componentes pasivos (resistencias, condensadores, etc.) como los activos (aquellos con una respuesta no lineal, el ejemplo más claro son los transistores) son, esencialmente, consumidores de potencia. Por lo tanto, es necesaria la existencia de algún otro componente capaz de proporcionarles esa potencia: las fuentes de alimentación.

Es importante aclarar aquí que el término "fuente" de alimentación puede dar lugar a cierto malentendido. Aunque muchas veces se considera que esa fuente es la que genera la potencia para hacer funcionar un determinado circuito, lo cierto es que la fuente a su vez necesita estar alimentada. En sentido estricto, la fuente de alimentación no genera la corriente eléctrica, si no que transforma un tipo de corriente determinado en otro apropiado para alimentar el circuito. Así, las fuentes que se van a estudiar en este capítulo transformarán la corriente alterna (apropiada para la distribución) en corriente continua de baja tensión. Este tipo de fuentes es las más habituales al trabajar con circuitos electrónicos.

Se van a estudiar los dos grandes tipos de fuentes de corriente continua, con sus diferencias y características propias, las etapas que las forman y las consideraciones a tener en cuenta para su diseño y utilización.

6.1 TIPOS Y LIMITACIONES

La práctica totalidad de las fuentes de alimentación discretas reales son fuentes de tensión. Si bien para la polarización de componentes activos dentro de un circuito integrado es frecuente el uso de fuentes de intensidad, es harto improbable encontrarse con una fuente de este tipo en forma de dispositivo en un laboratorio de electrónica. Se van a considerar por lo tanto aquí, únicamente, las fuentes de tensión.

Como su propio nombre indica, una fuente de tensión ha de ser capaz de mantener una tensión de salida constante para cualquier valor de la carga que esté alimentando. Así, en la Figura 6.1(a), aparece una fuente de 5 V proporcionando alimentación a una carga con una resistencia equivalente de 1 K, es decir que la fuente estará generando una intensidad de corriente eléctrica de:

$$I = \frac{5V}{1 \cdot 10^3 \Omega} = 5 \cdot 10^{-3} A = 5mA$$

Y la potencia que estará proporcionando al circuito será:

$$P = V \cdot I = 5V \cdot 5 \cdot 10^{-3} A = 25 \cdot 10^{-3} W = 25mW$$

Ahora bien, si cambiamos la carga por una de 10 Ω, tal y como aparece en la Figura 6.1(b), los valores de intensidad y potencia generados por la fuente cambiarán:

$$I = \frac{5V}{10\Omega} = 5 \cdot 10^{-1} A = 500mA$$

$$P = V \cdot I = 5V \cdot 5 \cdot 10^{-1} A = 25 \cdot 10^{-1} W = 2{,}5W$$

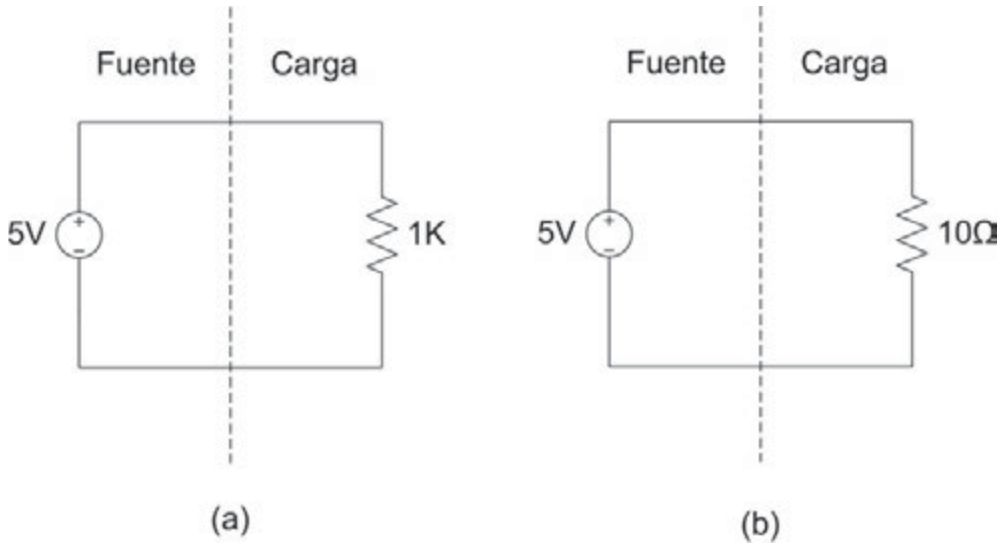


Figura 6.1. *Fuente de tensión alimentando diferentes cargas*

Para lograr esta independencia de la tensión de salida con la intensidad solicitada por la carga, las fuentes de alimentación utilizan un **regulador lineal**, que no es otra cosa que un componente con una relación i-v casi vertical, es decir, de tensión prácticamente constante para cualquier valor de la intensidad. Estos reguladores lineales pueden ser de muchas clases, desde aquellos basados en transistores hasta diodos zener; a lo largo del presente capítulo se estudiarán las diferentes técnicas de regulación. Es a causa del empleo de estos reguladores lineales que a este tipo de fuentes de alimentación se las denomina **fuentes de alimentación lineales**.

Lógicamente, el que la fuente proporcione un nivel de tensión constante no quiere decir que sea capaz de generar potencias arbitrariamente altas. Toda fuente tiene un límite de potencia máxima que es capaz de entregar a la carga, por encima de la cual se correría el riesgo de dañar los componentes internos de la fuente. De este modo, si a la fuente de tensión de los ejemplos anteriores (Figura 6.1) se le supone un límite de potencia de 3 W, y se le conecta una carga de 5 Ω, tendríamos:

$$P = V \cdot I = \frac{V^2}{R} = \frac{(5V)^2}{5\Omega} = 5W$$

Y la fuente podría resultar dañada. Para evitar esto, muchas fuentes tienen **limitadores de intensidad**, que disminuyen la tensión de salida cuando se alcanza una determinada intensidad, y así evitan que se sobrepasen la potencia máxima soportada por la fuente. Es responsabilidad del operador de la fuente ajustar el limitador de intensidad a un valor adecuado para la tensión que esté proporcionando la fuente.

En el caso del ejemplo, si la tensión entregada a la carga es de 5 V, y la potencia límite de la fuente son 3 W, la intensidad máxima que puede generar la fuente sin resultar dañada es de:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{3W}{5V} = 0{,}6A = 600mA$$

Y el usuario de la fuente debe asegurarse de ajustar el limitador a ese nivel.

¿Qué ocurre si colocamos una carga que requiera una intensidad mayor de la permitida por el limitador? Si a la fuente considerada se le conecta una resistencia de 5 ohm como carga, la intensidad que saldría de la fuente (en ausencia de limitación de intensidad) sería:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{5V}{5\Omega} = 1A$$

Por lo que el limitador entrará en efecto, limitando la intensidad a 600 mA. Como la relación *i-v* en la resistencia siempre viene dada por el valor de ésta, el efecto que esta limitación produce no es otro que una caída de tensión en la salida de la fuente, que no proporcionará ya 5 V sino:

$$V = I \cdot R = 600mA \cdot 5\Omega = 6 \cdot 10^{-1} A \cdot 5\Omega = 3V$$

Con lo cual la potencia generada por la fuente (y disipada en la carga) será:

$$P = V \cdot I = 3V \cdot 6 \cdot 10^{-1} A = 1{,}8W$$

Por debajo de la potencia máxima generable por la fuente.

Si a una fuente de tensión se le conecta una carga tal que la intensidad proporcionada por la fuente al circuito debería ser mayor a la que le permite el limitador de intensidad, el resultado es una caída de tensión en las bornas de la fuente.

Aunque también utilizan un regulador lineal, hay un tipo de fuente que se considera diferenciado de las fuentes lineales y que también se estudiará en este capítulo: las **fuentes conmutadas**. La diferencia con las anteriores estriba en la forma en que la corriente alterna de entrada se escala a valores de tensión apropiados para el resto de las etapas de la fuente. Mientras que las fuentes lineales, en sentido estricto, utilizan un transformador operando sobre la señal alterna de entrada, las fuentes conmutadas elevan la frecuencia de esta señal alterna mediante el una serie de transistores cambiando muy rápidamente entre sus zonas de corte y saturación; esta señal de muy alta frecuencia puede ser posteriormente transformada con un transformador mucho más pequeño (y barato). En el apartado correspondiente se verá con más detalle el funcionamiento de este tipo de fuentes.

¿SABÍAS QUE...?

Los elementos principales que forman una fuente de alimentación conmutada son: rectificación, filtrado, circuito de regulación, circuito de control, fuente primaria y convertidor cc/cc.

ACTIVIDADES 6.1

- Utilizando una fuente regulable en el laboratorio, a un nivel bajo de tensión (por ejemplo 5 V), coloque una resistencia entre sus terminales y a continuación reduzca el limitador de intensidad. Compruebe como al entrar en funcionamiento dicho límite, la tensión proporcionada por la fuente disminuye.
- Busque en las características técnicas de la fuente su valor máximo de potencia, y calcule un valor apropiado del limitador de intensidad para valores de tensión usuales (por ejemplo 5 V, 6 V y 12 V).
- Busque las diferencias entre una fuente de alimentación conmutada y una fuente lineal.

6.2 FUENTES DE ALIMENTACIÓN LINEALES

Una fuente de alimentación que proporcione un determinado nivel de tensión de corriente continua a partir de corriente alterna de distribución tiene que estar formada, como mínimo, por las etapas de **transformación**, **rectificación**, y **filtrado**. Como se verá en detalle al estudiar cada una de ellas, la combinación de estas tres fases proporciona una tensión de corriente continua *dependiente del valor de intensidad entregado por la fuente*. Es decir, que dependiendo de la carga que se conecte a la fuente de alimentación, la tensión de salida puede sufrir variaciones.

Esta dependencia no es apropiada para una fuente de tensión, que por definición ha de proporcionar un valor de tensión en sus bornas independiente de la intensidad entregada (siempre que la potencia generada por la fuente esté dentro de sus parámetros máximos). Para lograr esto, se introduce una cuarta etapa en las fuentes de alimentación, la etapa de **regulación**. Para ello se emplean los **reguladores lineales**, de donde proviene el nombre de **fuentes de alimentación lineales** o incluso **fuentes de alimentación reguladas lineales**.

De este modo, una fuente de alimentación lineal estará formada siempre por cuatro etapas (Figura 6.2):

- Transformación.
- Rectificación.
- Filtrado.
- Regulación.

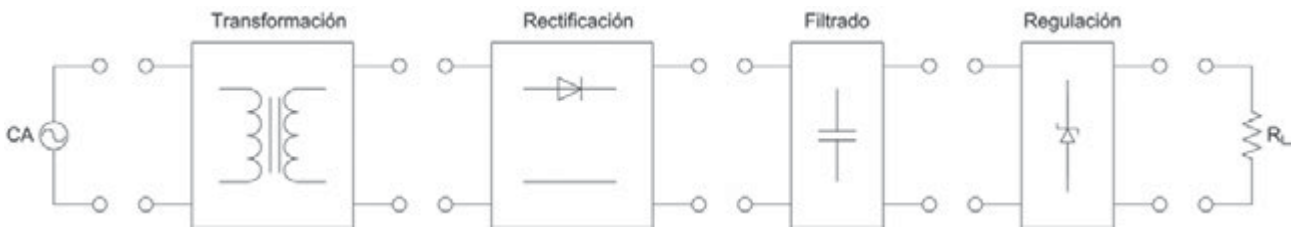


Figura 6.2. *Etapas de una fuente de alimentación lineal*

6.2.1 TRANSFORMACIÓN

El objetivo de la etapa de transformación es adecuar el nivel de la señal eléctrica proveniente de la distribución a aquel nivel requerido por las etapas posteriores. El componente que realiza esta función es el **transformador**, formado por la unión de dos o más bobinas, y cuyo símbolo es el mostrado en la Figura 6.3.

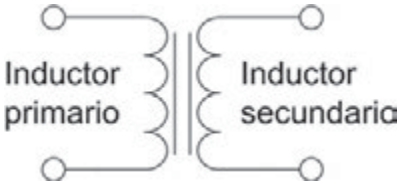


Figura 6.3. *Símbolo eléctrico del transformador*

Como se recordará, un inductor o bobina consiste en un conductor enrollado en forma de espiras alrededor de un núcleo aislante. Una corriente eléctrica circulando por dicho componente genera un campo magnético de acuerdo con la **Ley de Biot-Savart**. Por otro lado, un campo magnético variable generará en un conductor una **corriente inducida**, cuya intensidad viene dada por la **Ley de Faraday**, y su sentido según la **Ley de Lenz**. La combinación de ambas leyes determina que un inductor sometido a un campo magnético variable generará una corriente eléctrica igual a aquella que, aplicada al inductor, produciría un campo magnético que anularía el campo magnético original.

Un transformador, en su forma más simple, está formado por un acoplamiento de dos bobinas; una de ellas, llamada **inductor primario**, estará conectada a una tensión alterna de distribución. La otra, el **inductor secundario**, se hallará cerca del primario, en una configuración tal que el campo generado por aquel la afecte completamente. El objetivo de esta estructura es que el campo magnético creado por la corriente que pasa por el primario genere una determinada corriente inducida en el secundario. Es importante notar que la corriente inducida solo se generará si el campo magnético es variable, lo cual a su vez solo ocurrirá si la corriente en el primario también lo es. Por ello, *un transformador solo puede utilizarse con corriente alterna, nunca con corriente continua*.

En un transformador ideal, no existen pérdidas magnéticas, es decir que todo el campo generado en el inductor primario alcanza el secundario. Para intentar acercar los casos reales lo más posible a este caso ideal, muchos transformadores utilizan conductores magnéticos, como la ferrita, para unir ambos inductores.

Para dos inductores acoplados de forma ideal (sin pérdidas magnéticas), la relación entre las amplitudes de tensión y las corrientes en el primario y el secundario están determinadas por el número de vueltas en ambas bobinas.

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = m$$

Donde N_p y N_s son el número de vueltas en el primario y el secundario, respectivamente, V_p y V_s las amplitudes de tensión, I_p e I_s las de intensidad, y a la constante de proporcionalidad m se le denomina **razón de transformación**. Extrayendo la expresión de las potencias en el primario y en el secundario:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} \Leftrightarrow V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s \Leftrightarrow P_p = P_s$$

Por lo tanto la potencia entregada a la carga es igual a la potencia obtenida de la fuente de alterna, o lo que es lo mismo, en un transformador ideal no existe consumo de potencia.

La Figura 6.4 muestra un esquemático donde un transformador tiene el primario conectado a la corriente alterna de distribución, de amplitud V_p, y el secundario conectado a una carga R_L. El número de vueltas de cada uno de los inductores es N_p y N_s. Puede observarse que la corriente en el secundario será de signo contrario a la del primario, pero las tensiones tienen el mismo sentido en ambos inductores.

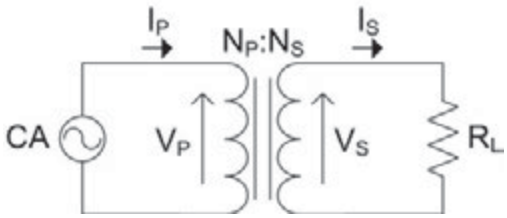


Figura 6.4. *Tensiones y corrientes en un transformador*

También es posible tener varias bobinas en el secundario, lo que causará la división de la tensión entre todas ellas de manera proporcional al número de vueltas de cada una. Así, en un circuito como el mostrado en la Figura 6.5, tenemos un secundario formado por dos bobinas con N_{s1} y N_{s2} vueltas. El secundario un total de $N_s = N_{s1} + N_{s2}$ vueltas, por lo que:

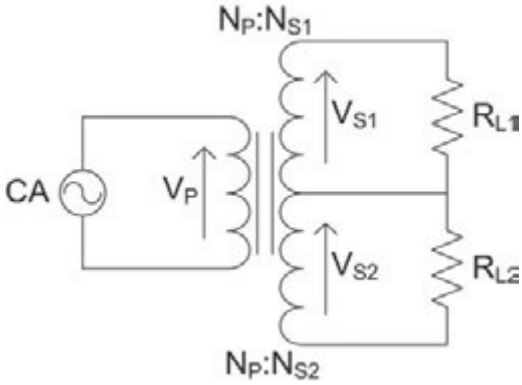


Figura 6.5. *Transformador con secundario de bobinado múltiple*

$$\frac{N_p}{N_{s1}+N_{s2}} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{V_p}{V_{s1}+V_{s2}}$$

Y las amplitudes de tensión en cada uno de los secundarios será:

$$V_{s1} = V_s \cdot \frac{N_{s1}}{N_{s1} + N_{s2}}$$

$$V_{s2} = V_s \cdot \frac{N_{s2}}{N_{s1} + N_{s2}}$$

En resumen, un transformador permite variar arbitrariamente la amplitud de una corriente alterna, permitiendo escalar la tensión de entrada al valor deseado para los circuitos electrónicos que alimentará la fuente.

6.2.2 RECTIFICACIÓN

La etapa de transformación cambia la amplitud de la señal alterna de entrada, pero esa señal sigue siendo alterna. Las fuentes de alimentación lineales deben proporcionar a los circuitos electrónicos corriente continua, por lo que es necesario algún tipo de dispositivo capaz de realizar esa conversión.

A ese dispositivo se le denomina **rectificador**. Existen muchas clases de rectificadores, aunque todos ellos se basan en diodos (ya sean diodos semiconductores, diodos de vacío, válvulas gaseosas, etc.) Parece lógico que así sea, puesto que el diodo es un componente que permite el paso de la corriente en un único sentido, lo cual lo hace ideal para transformar corriente alterna (que circula en ambos sentidos) en corriente continua (que lo hace únicamente en uno).

ACTIVIDADES 6.2

- Profundizar sobre los parámetros de rendimiento de los rectificadores haciendo uso del apéndice.

6.2.2.1 Rectificador de media onda

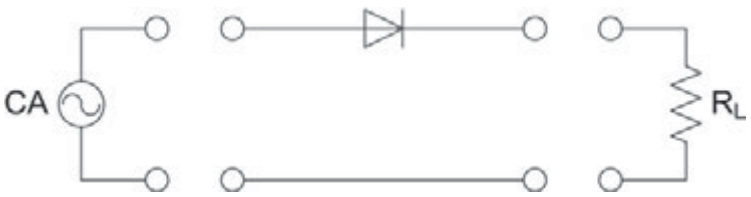


Figura 6.6. *Rectificador de media onda*

La Figura 6.6 muestra el rectificador más sencillo posible, llamado **rectificador de media onda**. Una corriente alterna de entrada atraviesa un diodo y alimenta una carga. Suponiendo que el diodo es ideal, durante la mitad del ciclo en que Vs es positiva (semiciclo positivo), el diodo estará directamente y por tanto permitirá el paso de la corriente entrando el ánodo y saliendo por el cátodo. Durante la otra mitad del ciclo (semiciclo negativo) estará inversamente polarizado y se comportará como un circuito abierto. La corriente que circulará por la carga tendrá valores siempre

positivos, o lo que es lo mismo, un único sentido. La Figura 6.7 muestra la señal de tensión alterna generada por la fuente y la tensión entregada a la carga.

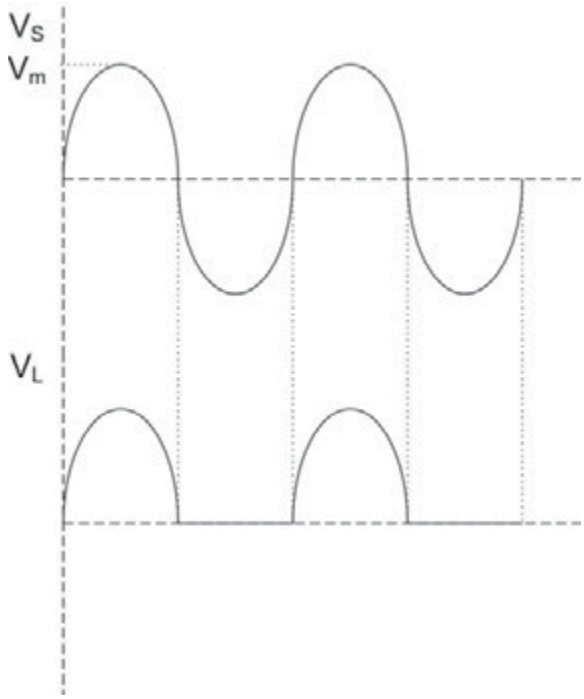


Figura 6.7. *Señales a la entrada y salida de un rectificador de media onda*

El voltaje pico inverso se alcanzará durante el semiciclo negativo, cuando el diodo esté polarizado inversamente, y puede apreciarse en la Figura 6.7 que su valor será *Vm*.

6.2.2.2 Rectificador de onda completa

Los rectificadores de media onda tienen la desventaja de que la señal rectificada es nula durante la mitad del ciclo, lo cual supone una tensión efectiva de salida inferior. Para evitar esto, pueden utilizarse **rectificadores de onda completa**, como el que aparece en la Figura 6.8.

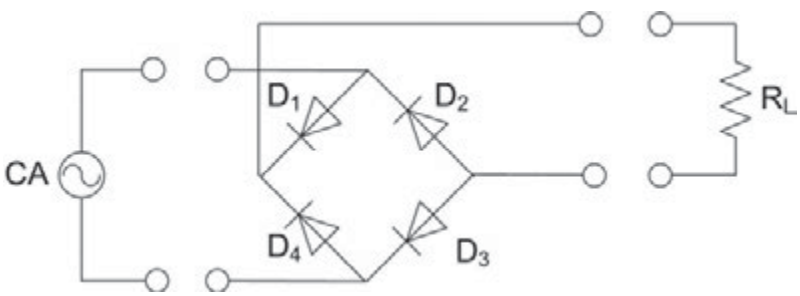


Figura 6.8. *Rectificador de onda completa a puente de diodos*

Durante el semiciclo positivo, la corriente circulará por los diodos D1 y D3, mientras que durante el semiciclo negativo lo hará por D2 y D4. En ambos casos la corriente eléctrica atraviesa la carga en el mismo sentido, dando lugar a una intensidad con una forma de onda como la mostrada en la Figura 6.9. Este montaje recibe el nombre de **puente de diodos**, y su única desventaja es el requerir cuatro diodos en lugar de uno solo.

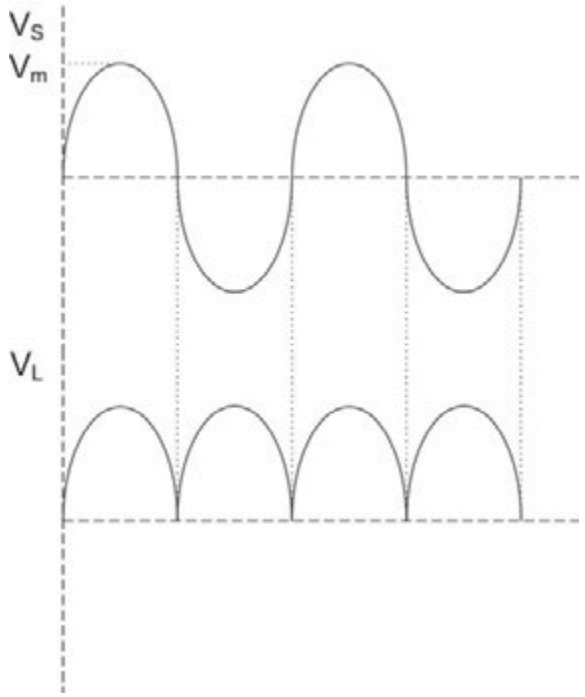


Figura 6.9. *Señales a la entrada y salida de un rectificador de onda completa*

Otro tipo de rectificador de onda completa se puede utilizar cuando el la etapa de transformación precedente tenga un secundario formado por dos inductores iguales, si tomamos el terminal central como neutro. Supongamos un circuito como el mostrado en la Figura 6.10.

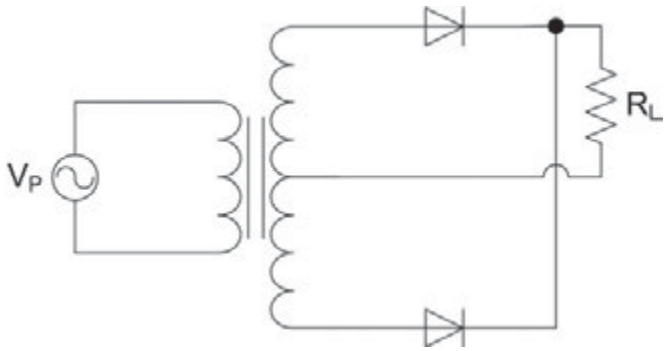


Figura 6.10. *Rectificador de onda completa con transformador de secundario múltiple*

Ambos diodos reciben una señal alterna con la misma amplitud, pero mientras uno estará polarizado directamente durante el semiciclo positivo, el otro lo estará en el negativo. De este modo, ambos funcionarán como un rectificador de media onda, pero en los semiciclos inversos, con lo cual la superposición de ambas señales en la carga será igual a la de un rectificador de onda completa, utilizando únicamente dos diodos.

ACTIVIDADES 6.3

- Realiza una tabla clasificando los distintos rectificadores e indicando sus diferencias.

6.2.3 FILTRADO

A la salida de la etapa de rectificación, la señal de tensión, si bien es siempre positiva, sigue variando con una frecuencia igual a la señal alterna de distribución. Esta señal no es por tanto adecuada para alimentar los circuitos electrónicos, que necesitan un nivel constante de tensión de alimentación. Por ello, es necesaria una etapa de filtrado que elimine esta componente en frecuencia.

El filtro más sencillo consiste en un condensador colocado en paralelo con la carga, como se muestra en la Figura 6.11. De manera cualitativa y como aproximación, se puede asumir que el condensador se comportará como un circuito abierto para la componente continua, mientras que para la componente alterna lo hará como un cortocircuito. De este modo, en alterna la carga estará cortocircuitada a tierra (es decir, la amplitud alterna de salida será nula), por lo cual únicamente la componente continua de la tensión alcanzará la carga.

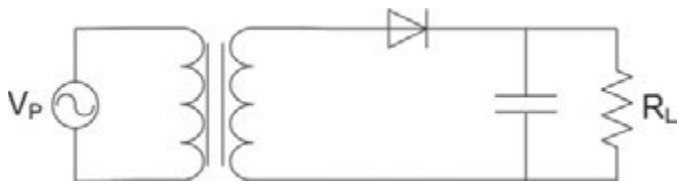


Figura 6.11. *Filtro sencillo a condensador*

En realidad esto solo ocurre así si se considera un condensador ideal. Los condensadores reales no son cortocircuitos perfectos para señales alternas, sino que tendrán una impedancia equivalente relativamente baja, en función de la frecuencia de la señal alterna y del valor de su capacidad. Como consecuencia, la señal de salida no será una tensión continua perfecta, sino que tendrá pequeñas variaciones. En la Figura 6.12 puede observarse la gráfica de la tensión de salida de una etapa de filtrado a condensador, indicando el la **tensión de rizado** pico a pico (el valor máximo menos el valor mínimo de tensión).

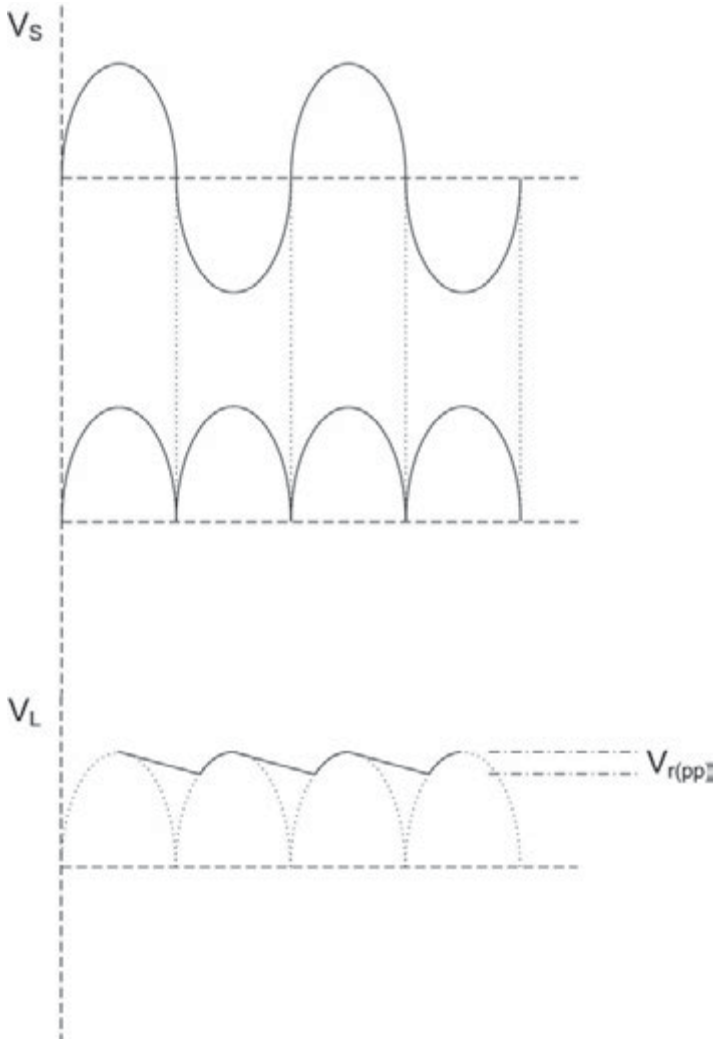


Figura 6.12. *Efecto de un en la señal rectificada*

Se define también el **factor de rizado**, que es la relación entre el valor eficaz (o valor cuadrático medio) de la tensión de rizado y el valor absoluto de la componente continua de la tensión de salida, expresado en porcentaje.

$$F_r = 100 \cdot \frac{V_{r(ef)}}{V_o}$$

El cálculo del valor eficaz de la tensión de rizado requiere la integración de la señal en un período y es relativamente complejo. Por ello, se estudiarán aquí algunos casos particulares.

6.2.3.1 Filtros a condensador

Se vuelve a considerar el caso en el que el filtrado lo realiza un condensador colocado en paralelo a la carga. Tras un pico máximo en la tensión de entrada (punto A en la Figura 6.13), el condensador estará completamente cargado. A partir de ese momento, la tensión de entrada desciende y el condensador comienza a entregar la carga que tiene almacenada, haciendo que la tensión de salida caiga más lentamente que la de entrada. El condensador continuará descargándose hasta que la tensión de entrada vuelva a aumentar en el siguiente semiciclo; cuando la tensión de entrada alcance el valor que está entregando el condensador (punto B), el rectificador volverá a conducir, y aquel se cargará de nuevo.

¿SABÍAS QUE...?

Los condensadores que se utilizan en las etapas de filtrado suelen ser de tipo electrolítico.

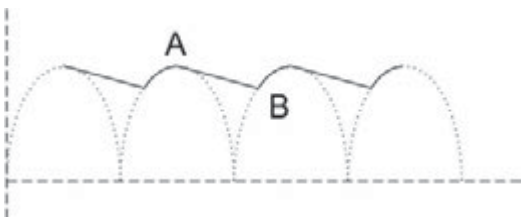


Figura 6.13. *Señales eléctricas en un filtro a condensador*

Si la constante de tiempo $\tau = R \cdot C$ es mucho mayor que el período de la tensión de entrada ($\tau >> T$), es posible asumir que la tensión en el condensador desciende linealmente. Si además el rizado es pequeño en relación con el valor constante de tensión, la corriente que recorre la carga puede considerarse constante. En estas condiciones, la tensión de rizado puede pico a pico se puede aproximar mediante:

$$V_{r(pp)} = \frac{V_m}{2 \cdot f \cdot R \cdot C} \text{ (para rectificadores de onda completa)}$$

$$V_{r(pp)} = \frac{V_m}{f \cdot R \cdot C} \text{ (para rectificadores de media onda)}$$

El factor de rizado queda:

$$F_r = \frac{V_{r(ef)}}{\overline{V}_L} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot (4 \cdot R \cdot f \cdot C - 1)} \text{ (onda completa)}$$

$$F_r = \frac{V_{r(ef)}}{\overline{V}_L} = \frac{1}{\sqrt{3}\cdot\left(2\cdot R\cdot f\cdot C-1\right)} \text{ (media onda)}$$

Puede observarse que el factor de rizado es inversamente proporcional a la capacidad del condensador, lo cual es lógico ya que el condensador ideal, que suprimiría completamente la componente alterna, es aquel con una capacidad igual a infinito. La consecuencia directa es que *la señal a la salida de un filtro a condensador de una fuente de alimentación será más estable cuando mayor sea la capacidad del condensador.*

En una fuente como la que aparece en la Figura 6.14, con una señal de tensión a la entrada de la etapa de filtrado de 12 V de amplitud y 50 Hz de frecuencia, se tendría:

$$F_r = \frac{1}{\sqrt{3}\cdot\left(4\cdot 50\cdot 100\cdot 10^3\cdot 1200\cdot 10^{-6}-1\right)} = 2{,}4\cdot 10^{-3} \Rightarrow F_r = 0{,}24\%$$

$$V_{r(pp)} = \frac{12}{2\cdot 50\cdot 100\cdot 10^3\cdot 1200\cdot 10^{-6}} = 0{,}1V$$

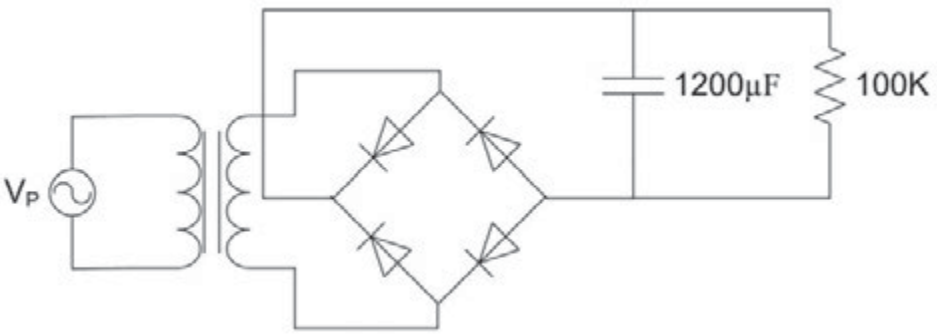


Figura 6.14. *Fuente de alimentación completa con un filtro a condensador*

ACTIVIDADES 6.4

- Para la corriente de distribución usual (220 V y 50 Hz), suponiendo que el transformador previo tiene una razón de transformación de 1/10, y se está utilizando un rectificador de onda completa, diseñe un filtro a condensador que proporcione un factor de rizado del 10%.
- Si se necesita modificar el filtro anterior para que el factor de rizado sea del 5%, sin cambiar la resistencia y con el mínimo número de modificaciones, ¿qué valor debe tener el condensador?

¿SABÍAS QUE...?

Puede profundizar más sobre el análisis armónico de los filtros en el apéndice.

6.2.3.2 Combinaciones de filtro. Filtros LC

Los filtros de salida realizados con un solo condensador son adecuados en la mayoría de los casos, máxime si se tiene en cuenta que el regulador de salida, que se estudiará más adelante, tiene también cierta capacidad de filtrado. Sin embargo, para ciertas aplicaciones puede ser necesario que la salida del filtro tenga un rizado aún menor que el que podemos conseguir con un filtro simple como los vistos hasta ahora.

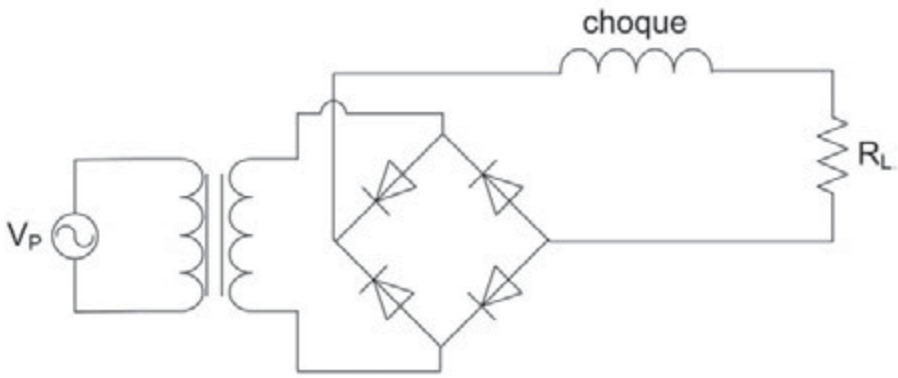


Figura 6.15. *Filtrado mediante inductor (choque)*

Cuando se necesitan mejores prestaciones de filtrado, es habitual utilizar una combinación de condensador y e inductor, dando lugar al filtro LC (Figura 6.16). La bobina situada en serie con la carga proporciona una baja impedancia a la señal continua y una alta impedancia a la componente alterna, lo cual impide el paso de la señal en frecuencia a la carga. Además, el condensador situado en paralelo actúa de manera inversa, ofreciendo a esta componente alterna un camino de baja impedancia hacia tierra. Este tipo de montajes son capaces de proporcionar una tensión prácticamente pura en la resistencia de carga.

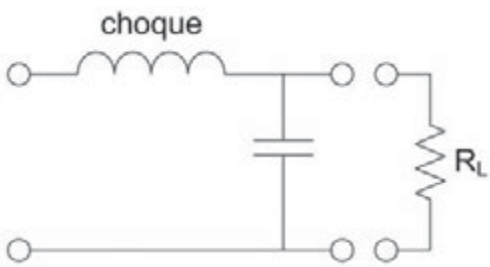


Figura 6.16. *Filtro en configuración LC*

Si se necesitase aún un mejor filtrado, es posible encadenar varias secciones LC conectadas en serie. Cada una de ellas filtrará la señal de salida de la sección anterior (Figura 6.17(a)). Otra posibilidad que proporciona aún un mejor filtraje es la conexión en *pi* (π), como se muestra en la Figura 6.17(b).

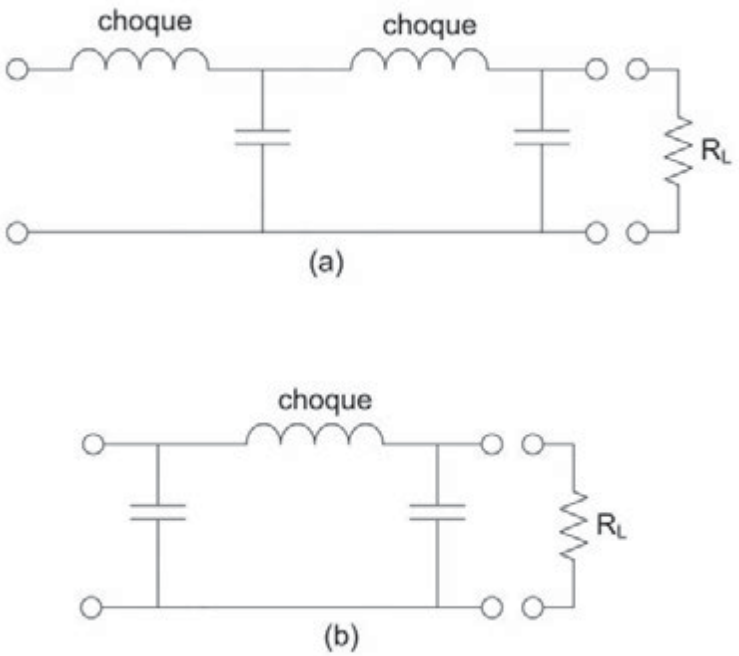


Figura 6.17. *Filtro en configuración pi (ϖ)*

¿SABÍAS QUE...?

En ingles, se dice:

- Fuente de alimentación: *power supply*.
- Convertidor directo: *forward converter*.
- Rectificación: *rectification*.
- Rectificación de media onda: *half-wave rectification*.
- Rectificación de onda completa: *full-wave rectification*.

6.2.4 REGULACIÓN

La salida de la etapa de filtrado proporciona un nivel de tensión constante para un determinado valor de la resistencia de carga. Ya se ha visto que esta señal puede ser arbitrariamente pura, puesto que nada impide conectar tantas etapas de filtrado como sea necesario hasta reducir el rizado de salida al nivel deseado. ¿De donde surge la necesidad entonces de una etapa adicional de regulación?

Hasta ahora se ha supuesto que los componentes de nuestra fuente carecían por completo de resistencias parásitas; en estas circunstancias, la utilidad de la etapa de regulación puede ser discutible. Sin embargo, los componentes reales tienen impedancias de salida no nulas que pueden hacer que la tensión de salida de la fuente de alimentación no sea completamente independiente de la intensidad solicitada por la carga.

Supóngase una fuente como la mostrada en la Figura 6.18. Las diferentes impedancias parásitas han sido modeladas como una resistencia de salida serie tras la etapa de filtrado, R_s, de pequeño valor (10 Ω). La relación de transformación de 10:1 permite saber que en el secundario de la etapa de transformación se tendrá una señal alterna de 220 V de amplitud de tensión y 50 Hz de frecuencia.

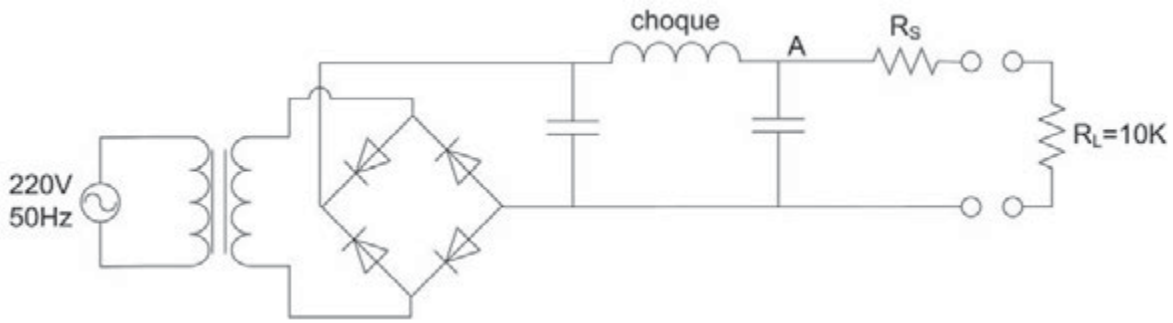


Figura 6.18. *Fuente completa sin la etapa de regulación*

El rectificador de onda completa a puente de diodos convertirá esa señal alterna en una señal pulsante. En cada uno de los semiciclos, la corriente estará atravesando dos de los diodos, en cada uno de los cuales estará cayendo una tensión igual a su tensión umbral (que supondremos igual a 0.7 V), con lo cual la tensión de pico a la antes del filtrado será similar a la mostrada en la Figura 6.19, con:

$$V_{\max} = 22 - 0{,}7 - 0{,}7 = 20{,}6V$$

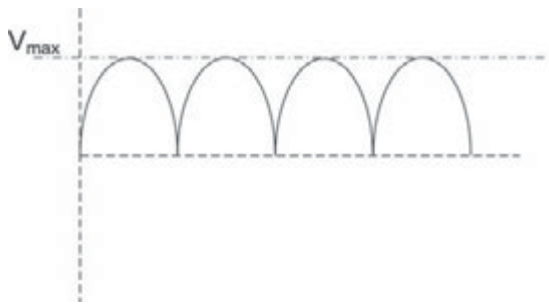


Figura 6.19. *Señal a la entrada del filtro para la fuente de la Figura 6.18*

El filtro en configuración π eliminará de forma prácticamente completa la componente alterna de esa señal, obteniendo en el punto A de la Figura 6.18 una señal de tensión continua casi pura y de valor muy cercano a V_{max} (puede suponerse igual a V_{max}). Si se calcula ahora la tensión que cae en la resistencia de carga, hay que realizar una división de tensión entre R_L y R_s:

$$V_o = V(R_L) = \frac{V_{\max} \cdot R_L}{R_L + R_s} = 20{,}6 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3 + 10} = 20{,}579V$$

Pero, ¿y si se cambia la resistencia de carga por otra de valor inferior? Sea Rl = 1 K:

$$V_o = V(R_L) = \frac{V_{\max} \cdot R_L}{R_L + R_s} = 20{,}6 \cdot \frac{1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 10} = 20{,}396V$$

Puede observarse que la tensión de salida no es completamente independiente de la carga, o lo que es lo mismo, depende de la intensidad que le solicitemos a la fuente. Cuanta más intensidad solicitemos, mayor será la caída de tensión en la resistencia parásita de salida R_s, con lo cual la tensión que veremos en las bornas de la fuente se verá disminuida. El efecto contrario se produce si aumentamos la resistencia de carga.

Para evitar este efecto, completamente indeseable, se utiliza un **regulador**, que es un dispositivo que es fuerza un valor de tensión constante en su salida; el más simple es el regulador a **diodo zener**. Un diodo zener, cuyo símbolo eléctrico aparece en la Figura 6.20, es un dispositivo semiconductor muy similar al diodo normal, pero que además tiene la capacidad de funcionar como regulador *cuando se polariza inversamente*. La curva *i-v* de un diodo zener típico se muestra en la Figura 6.21. Puede observarse que, polarizado directamente, se comporta de manera muy similar a un diodo convencional, pero cuando la tensión inversa de polarización alcanza un valor, llamado **tension zener** (V_Z), la curva se vuelve casi vertical, independizando la tensión de la corriente.

Figura 6.20. *Símbolo eléctrico del diodo zener*

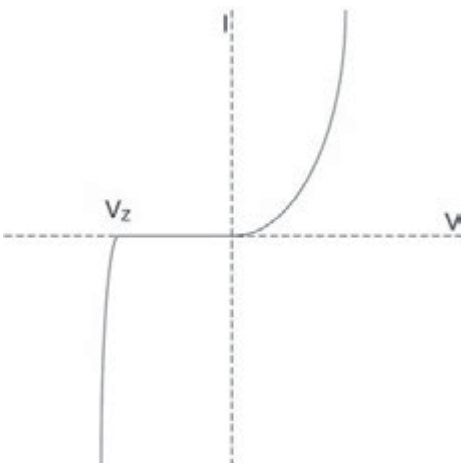


Figura 6.21. *Curva característica de un diodo zener*

6.2.4.1 Regulador paralelo

Si se coloca por un diodo zener inmediatamente antes de la salida de una fuente lineal, se puede asegurar que la tensión de salida no variará a pesar de que se produzcan cambios en la intensidad de salida. Supóngase que a la fuente del ejemplo anterior le añadimos un regulador paralelo con un diodo zener de $V_Z = 20$ V (Figura 6.22).

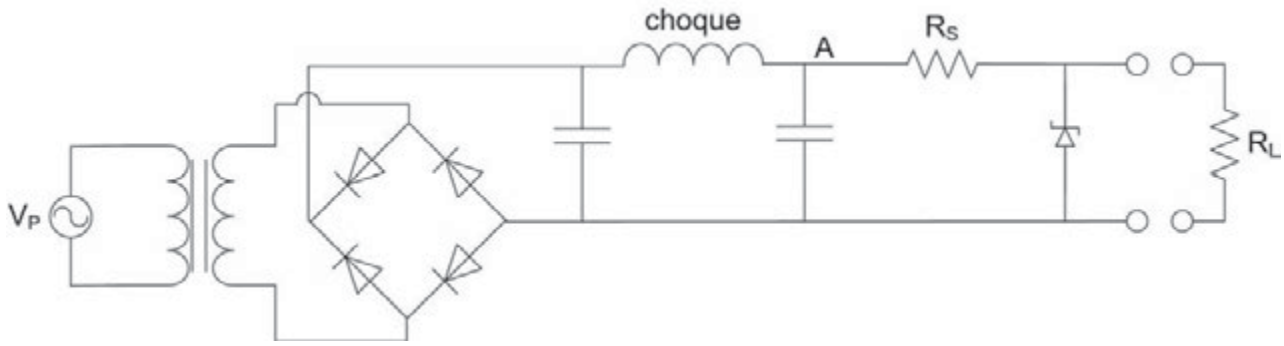


Figura 6.22. *Fuente completa con regulador paralelo a diodo zener*

Por la curva característica del zener, se puede asegurar que mientras el diodo este polarizado inversamente, la tensión de salida de la fuente V_0 será igual a V_Z, y la tensión restante (V_A - V_Z) estará cayendo en la resistencia parásita R_s. Para dos casos que se analizaron anteriormente (R_L= 10 K y R_L = 1K):

$$\left.\begin{array}{r} V_A = 20{,}6V \\ V_Z = 20 \end{array}\right\} \Rightarrow V(R_s) = 0{,}6V \Rightarrow I(R_s) = \frac{0{,}6V}{10\Omega} = 60mA$$

$$R_L = 10K \Rightarrow V(R_L) = V_o = V_Z = 20V \Rightarrow I(R_L) = \frac{20V}{10 \cdot 10^3 \Omega} = 2mA$$

Y por el zener circulará una corriente de 58 mA, con lo cual el diodo estará disipando una potencia P = 20 V · 58 · 10^{-3} A = 1,16 W.

$$R_L = 1K \Rightarrow V(R_L) = V_o = V_Z = 20V \Rightarrow I(R_L) = \frac{20V}{1 \cdot 10^3 \Omega} = 20mA$$

Y por el zener circularán 40mA, con una disipación de potencia en este caso P = 20 V · 40 · 10^{-3} A = 0,8 mW.

Es importante notar que el valor de V_Z del estabilizador paralelo debe ser ligeramente inferior al valor de pico de la señal que sale de la etapa de filtrado. Si V_Z fuese mayor, el diodo no tendría suficiente tensión entre sus terminales para alcanzar su tensión de zener y no funcionaría como regulador. Por otro lado, si V_Z fuese mucho menor que esa tensión de pico, la corriente que circularía por el diodo sería muy elevada y se correría el riesgo de superar su valor máximo de potencia, corriendo el riesgo de dañar el componente.

6.2.4.2 Regulador SERIE

Otro tipo de reguladores que también utilizan diodos zener como elemento fundamental son los reguladores serie. En este caso, el diodo se combina con un transistor, lo que le permite funcionar en circuitos con mayores requerimientos de potencia. El esquema de un regulador serie se muestra en la Figura 6.23, donde se han obviado las etapas anteriores y se ha representado únicamente el regulador y la carga. Este regulador proporciona una salida estable igual a la tensión zener menos la tensión umbral de la unión BE del transistor (usualmente 0,7 V).

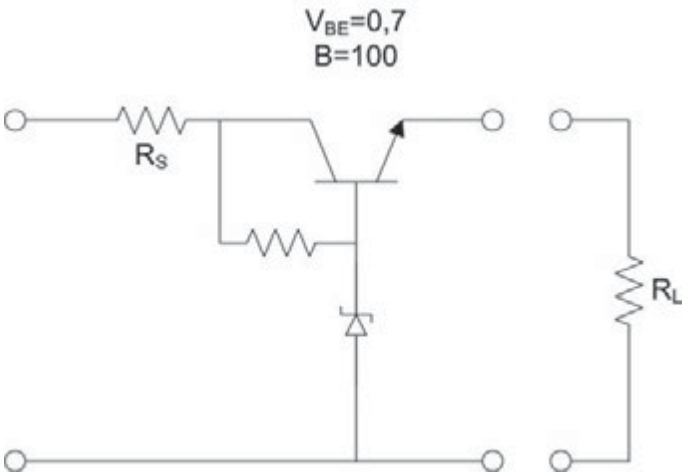


Figura 6.23. *Un regulador serie*

$$V_o = V_Z - V_{be} = 20 - 0{,}7 = 19{,}3V$$

6.2.4.3 Reguladores Integrados

Actualmente, existen numerosos dispositivos integrados, de elevada complejidad interna, diseñados para funcionar como reguladores. Externamente son similares a transistores de potencia, ya que constan de tres terminales (entrada, salida y tierra).

¿SABÍAS QUE...?

Los reguladores integrados más utilizados son los pertenecientes a la serie 78xx.

Su utilización es muy sencilla, basta con conectar su terminal de entrada a la etapa de filtrado y el terminal de tierra a la misma, para obtener en su terminal de salida una nivel de tensión perfectamente regulado y estabilizado. Únicamente hay que tener cierta precaución para no sobrepasar los valores máximos especificados en su hoja de características. Dado que normalmente estos componentes van a estar disipando valores de potencia muy elevados, es frecuente utilizar con ellos diferentes tipos de disipadores térmicos para evitar que las altas temperaturas los dañen.

La única desventaja de este tipo de reguladores es que normalmente necesitan valores de entrada más elevados que los reguladores a zener, para un mismo nivel de tensión de salida.

ACTIVIDADES 6.5

- Obtenga una hoja de datos (*datasheet*) de alguno de los reguladores integrados de la seria 78xx. Observe las notas de aplicación y los circuitos sugeridos. ¿Le recuerdan a algunos de los circuitos estudiados en el tema?

6.3 FUENTES CONMUTADAS

Las fuentes de alimentación lineales que se han estudiado hasta ahora tienen la ventaja de ser relativamente simples en su diseño, y comparativamente baratas cuando se utilizan para bajas potencias (menos de unos 25 W). Sin embargo tienen dos problemas importantes:

- Necesitan un transformador de baja frecuencia (50 Hz en Europa). Un transformador es más grande y pesado cuanta menor es su frecuencia de funcionamiento, por lo cual en estas fuentes se pueden llegar a tamaños considerables.
- La regulación se realiza mediante disipación de calor. En las fuentes lineales la tensión que alcanza la etapa de regulación está por encima de la tensión de salida, y esta diferencia es disipada en el propio regulador. Sería deseable hallar un sistema de regulación que minimizase ese exceso de tensión sin consumir tanta potencia.

Las fuentes conmutadas, que se verán a continuación, solucionan estos problemas mediante el empleo de conversores DC-DC. En estas fuentes, la señal de entrada proveniente de la distribución es rectificada y filtrada en primer lugar, obteniendo una señal continua (no regulada). A continuación esta señal se introduce en un inversor, que mediante el empleo de transistores funcionando en sus zonas de corte y saturación "trocea" la señal continua generando una señal cuadrada a muy alta frecuencia. Esta señal de alta frecuencia pasa después a un transformador, que la escala al nivel de salida deseado (además de proporcionar aislamiento eléctrico) para ser posteriormente rectificada y filtrada de nuevo, obteniéndose así una tensión continua de salida al nivel deseado. La Figura 6.24 muestra un diagrama general de una fuente conmutada.

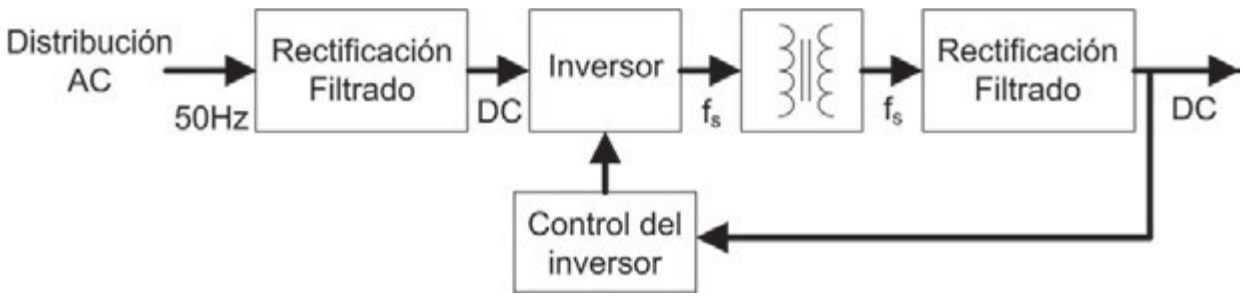


Figura 6.24. *Etapas de una fuente conmutada típica*

¿SABÍAS QUE...?

Las fuentes de alimentación conmutadas suponen una mejora debido a que su rendimiento es bastante mejor, ya que consume menos y ocupa menos espacio al no necesitar un transformador reductor de potencia a la entrada.

Se ha resuelto uno de los problemas relacionados con las fuentes lineales, el empleo de un transformador de baja frecuencia, pero no se ha establecido mecanismo alguno de regulación, con lo cual la tensión de salida podría variar ante diferentes requerimientos de intensidad por parte de la carga. En las fuentes conmutadas esto se soluciona mediante un circuito de control que está continuamente monitorizando la salida final, y actúa sobre el inversor, modificando la tensión que este produce (más concretamente el **ciclo de trabajo** de la señal) de manera que aquella permanezca estable.

A continuación se introducirán los elementos de las fuentes conmutadas que no son comunes con las lineales, es decir, el **control del inversor** y el **inversor** propiamente dicho. La regulación y el filtrado se realizan de la misma manera que en las fuentes reguladas, si bien ser las señales de una frecuencia mayor normalmente el filtrado puede hacerse con componentes de menor tamaño.

6.3.1 INVERSOR. TOPOLOGÍAS DC-DC.

El circuito inversor genera una señal alterna de alta frecuencia a partir de una señal continua procedente de la primera etapa de filtrado. Al estudiar las diferentes configuraciones de inversor, se hará en unión con la etapa de transformación y rectificación posteriores, al estar todas ellas íntimamente relacionadas. Se habla entonces de conversores DC-DC (ya que tanto la entrada como la salida son en continua) en lugar de simplemente inversores.

Se consideran a continuación las principales topologías de conversores DC-DC con aislamiento por transformador: **flyback**, **push-pull** (o en **contrafase**), de **medio puente** y de **puente completo**.

6.3.1.1 Conversor flyback

La Figura 6.25 muestra el esquema de un conversor *flyback*. El transistor Q1 actúa como conmutador en este caso, cambiando entre las zonas de corte y saturación.

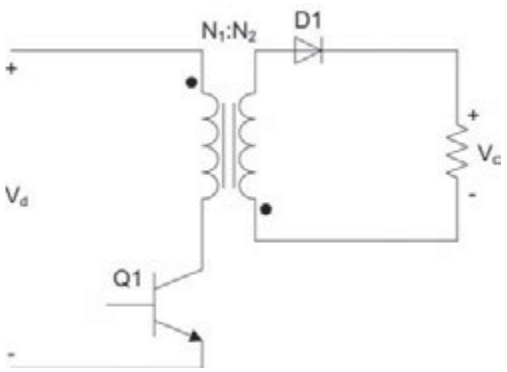


Figura 6.25. *Conversor flyback*

Cuando el transistor Q1 se activa, el diodo D1 se polariza inversamente (teniendo en cuenta que las polaridades en el transformador están invertidas), impidiendo el paso de la corriente. Al desactivarse Q1, la energía almacenada en los bobinados del transformador fluye por el secundario atravesando el diodo, polarizado ahora directamente. El voltaje medio de salida de un inversor *flyback* rectificado viene dado por la expresión:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{D}{1-D}$$

donde D es el ciclo de trabajo $\frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$.

6.3.1.2 Conversor Push-Pull

El esquema de un conversor *push-pull* aparece en la Figura 6.26. Al igual que en el caso anterior, las polaridades entre el primario y el secundario del transformador están invertidas. En este conversor existen dos transistores actuando como conmutadores, y es importante recalcar que no deben estar en ningún caso activos los dos al mismo tiempo. Se activará Q1, posteriormente se activará Q2, y el resto del ciclo permanecerán los dos desactivados. Esto es importante a la hora de diseñar el circuito de control del inversor, como se verá más adelante.

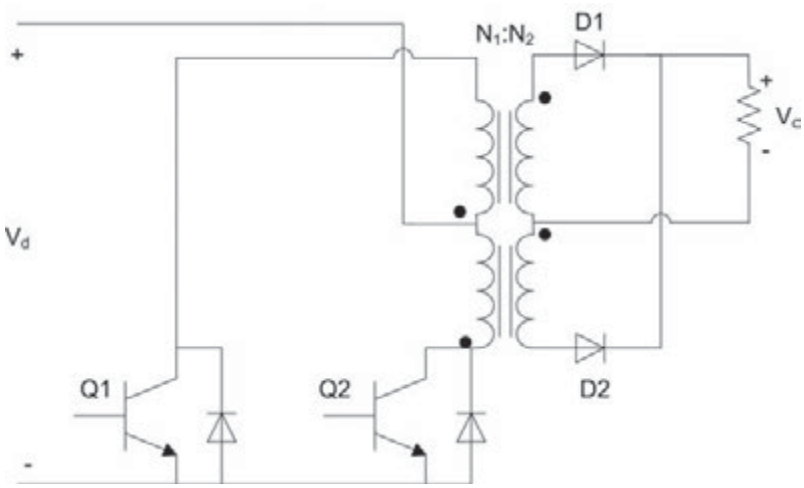


Figura 6.26. *Conversor push-pull*

Al activar Q1, el diodo D1 está polarizado directamente y D2 inversamente, mientras que al activar Q2 ocurre lo contrario. Cuando ambos transistores estén en corte, tanto D1 como D2 impedirán el paso de la corriente; en este momento los diodos conectados en paralelo con los transistores se vuelven necesarios para proporcionar un camino a la corriente de fugas del transformador. La relación de tensión entrada salida es:

$$\frac{V_o}{V_d} = 2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot D0 < D < 0{,}5$$

donde ahora $D = \frac{t_{on1}}{t_{on1} + t_{on2} + t_{off}} = \frac{t_{on2}}{t_{on1} + t_{on2} + t_{off}}$ es el ciclo de trabajo de los transistores Q1 y Q2 y debe ser, lógicamente, menor de 0.5.

6.3.1.3 Conversor de medio puente

En un conversor de medio puente (Figura 6.27) los condensadores C1 y C2 establecen un punto de tensión media entre cero y la tensión de entrada Vd, y los transistores Q1 y Q2 se activan alternativamente igual que en el caso del conversor *push-pull*.

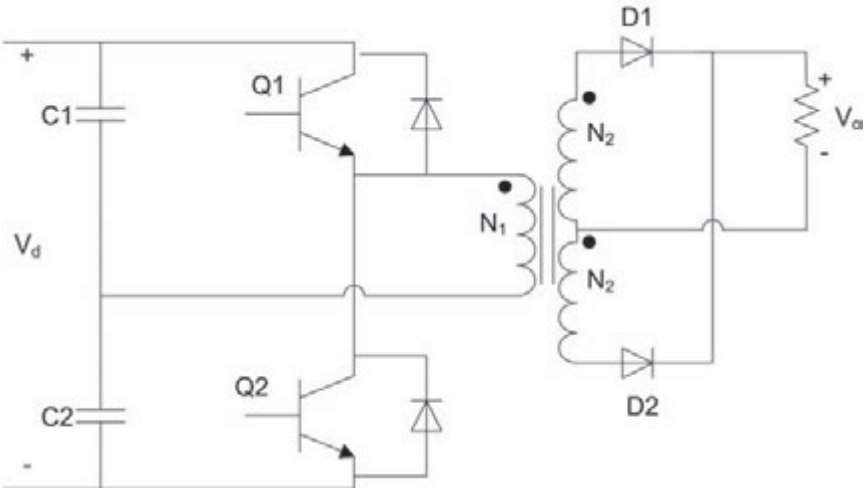


Figura 6.27. *Conversor de medio puente*

Mientras Q1 está activo, Vd/2 aparece a través del primario del transformador, y cuando se activa Q2, un voltaje inverso de magnitud Vd/2 aparece a través de dicho primario. El voltaje promedio de salida viene dado por la relación:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{N_2}{N_1} \cdot D0 < D < 0{,}5$$

6.3.1.4 Conversor de puente completo

Un conversor DC-DC a de puente completo, como el mostrado en la Figura 6.28, requiere que los transistores sean activados a pares, (Q1, Q2) o (Q3, Q4).

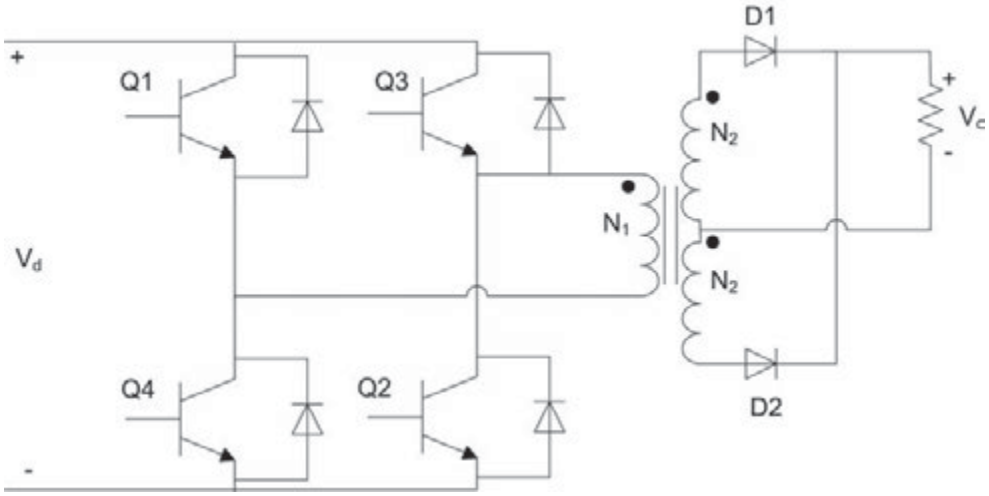


Figura 6.28. *Conversor de puente completo*

Cuando Q1 y Q2 están activos, el voltaje en el primario será Vd, mientras que si Q3 y Q4 están activos aparecerá en él un voltaje inverso –Vd. El voltaje promedio será entonces:

$$\frac{V_o}{V_d} = 2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot D0 < D < 0{,}5$$

Una comparación entre los conversores de medio puente (*Half Bridge*, HB) y puente completo (*Full Bridge*, FB) muestra que para los mismos niveles de tensión de entrada y salida requieren la siguiente relación entre las vueltas de los transformadores:

$$\left(\frac{N_2}{N_1}\right)_{HB} = 2 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)_{FB}$$

ACTIVIDADES 6.6

- Haz una tabla indicando los tipos de conversores explicados en el capítulo e indica sus principales diferencias.

6.3.2 CONTROL DEL INVERSOR

Al estudiar las diferentes configuraciones de los conversores DC-DC, se ha visto que todos ellos requieren la activación o desactivación de un determinado número de transistores funcionando en conmutación. Ahora se va a analizar el módulo que genera las señales de control de esos transistores.

Se ha visto en el apartado anterior que todas las relaciones entrada/salida de los conversores DC dependen del ciclo de trabajo. Parece lógico por tanto utilizar ese ciclo de trabajo (relación entre el tiempo t_{on} y t_{off} de los diferentes transistores) para controlar el nivel de la señal de salida, y corregirlo respecto a variaciones debidas a distintos consumos de intensidad en la carga. Así, se vuelve innecesario el uso de un regulador en este tipo de fuentes.

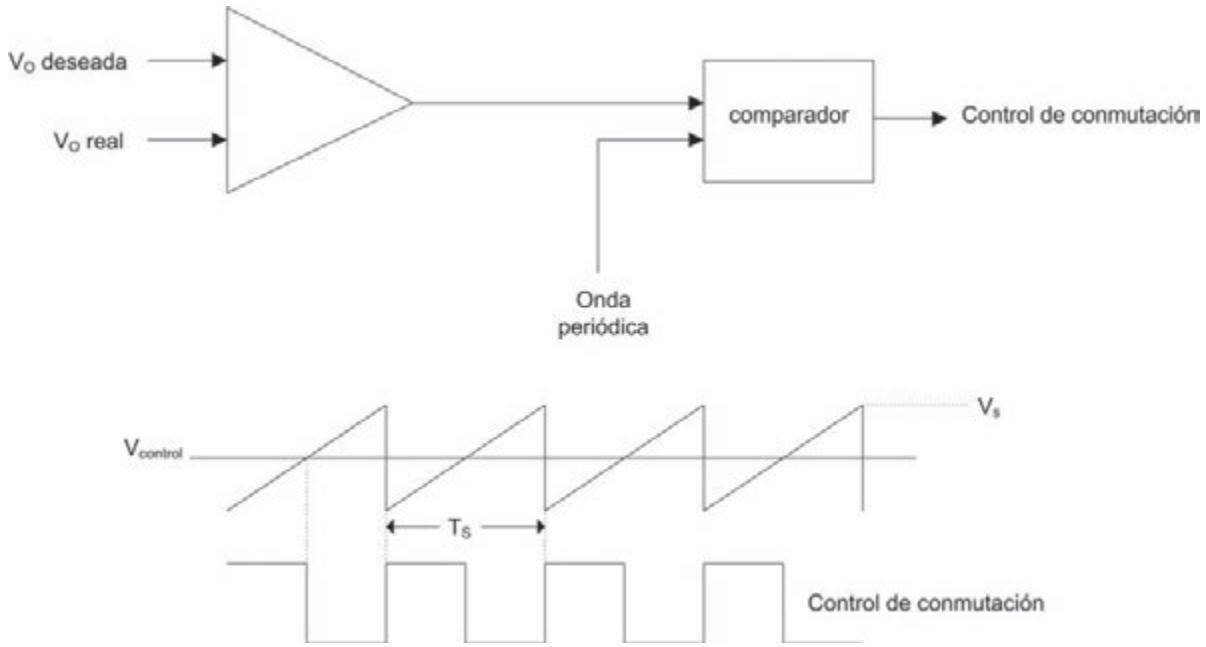


Figura 6.29. *Funcionamiento básico del control del inversor en una fuente conmutada*

La Figura 6.29 muestra como se realiza este control. Se genera una señal de control $v_{control}$ amplificando el error, esto es, la diferencia entre la tensión de salida deseada y la obtenida a la salida final de la fuente. Esa señal de error se compara con una onda periódica de tipo diente de sierra, que se genera en un oscilador interior al circuito de control. Cuando la señal de control esté por encima de la onda periódica de referencia, se mandarán las señales de control de conmutación a los transistores correspondientes al tiempo t_{on}, y cuando esté por debajo, se enviarán las correspondientes a t_{off}.

De este modo, un desvío en la tensión de salida respecto a la deseada provocará una variación en la señal de control, que a su vez provocará un cambio en la relación t_{on}/t_{off} (ciclo de trabajo), corrigiendo el nivel de salida del inversor y, en última instancia, el de la fuente completa.

ACTIVIDADES 6.7

- Las fuentes utilizadas en los ordenadores actuales son siempre conmutadas. Intente averiguar qué tipo de conversor utilizan. ¿Es siempre el mismo?
- Si puede obtener una fuente desechada desmóntela y trate de identificar cada elemento de la misma.

¿SABÍAS QUE...?

En inglés, se dice:
- Regulardor: *regulator*.
- Rizado: *ripple*.
- Regulación de carga: *load regulation*.
- Tierra: *ground*.

6.4 CASO PRÁCTICO

Como supuesto de un problema real de fuentes lineales, diseñe una fuente completa capaz de alimentar un circuito electrónico con 5 V a partir de la corriente de distribución normal (220 V de tensión y 50 Hz de frecuencia). La fuente ha de cumplir los siguientes requisitos:

- ✓ Entrada: 220 V, 50 Hz.
- ✓ Tensión de salida: 5 V.
- ✓ Potencia máxima: 2,5 W.
- ✓ Rizado a la salida del filtro: < 10%.

Se podrá utilizar cualquier tipo de rectificador, filtro y estabilizador, justificando en cada caso la elección del tipo de etapa. Si se utiliza algún componente integrado (por ejemplo, el regulador) será necesario obtener su hoja de datos y comprobar que sus características son las apropiadas para el diseño realizado.

RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este tema se han estudiado las fuentes de alimentación como origen de la potencia utilizada en todos los circuitos electrónicos.

Se han presentado los diversos tipos de fuentes que hay, con especial hincapié en las fuentes lineales.

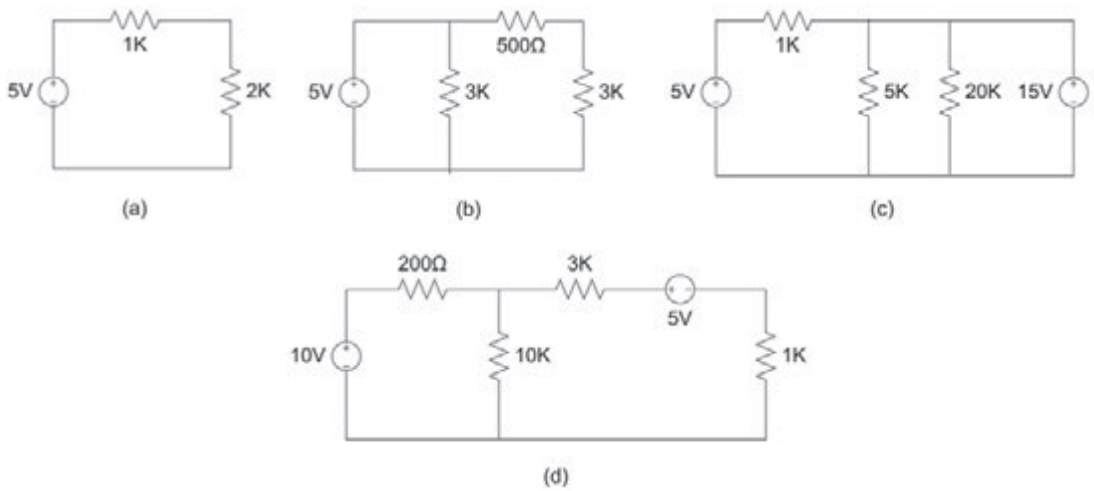
Como parte del análisis y diseño de las fuentes lineales, ha sido necesario comprender también algunos componentes que no habían aparecido hasta ahora, como el transformador o los diodos zener, así como técnicas de filtrado de señales y análisis armónico (se ha desarrollado en el apéndice).

Este último concepto es esencial para cualquier tipo de análisis de señales más avanzado en el dominio de la frecuencia.

Finalmente, se han introducido también los conceptos básicos del funcionamiento de las fuentes conmutadas, así como los tipos principales de inversores en los que éstas se basan.

EJERCICIOS PROPUESTOS

1. Para cada uno de los circuitos siguientes, intensidad de corriente eléctrica que sale de la(s) fuente(s) de alimentación, y la potencia entregada por cada una de ellas.



- **2.** Calcular a que valor deberemos situar el limitador de intensidad de una fuente:
  - de 12 V y 2 W de potencia máxima.
  - de 5 V y 5 W de potencia máxima.
  - de 10 V y 1 W de potencia máxima.
  - de 30 V y 6 W de potencia máxima.
- **3.** Para cada una de las fuentes de ejercicio anterior, calcular para que valores de la resistencia de carga la intensidad estará por debajo del límite calculado.
- **4.** Si tenemos una fuente de 5 V con un limitador de potencia de 50 mA, calcular que tensión de salida efectiva tendremos entre las bornas de la fuente, y cual será la potencia generada por la fuente, para una resistencia de carga de:
  - 10 ohmios.
  - 50 ohmios.
  - 200 ohmios.
  - 1 Kohmio.
- **5.** En una fuente basada en un rectificador de media onda, calcule el factor de rizado en la carga de 10 K si hay un condensador paralelo de 100 μF. Recalcule suponiendo que el rectificador es de onda completa.

TEST DE CONOCIMIENTOS

1 Las fuentes lineales se caracterizan por:
- **a)** Tener una etapa de transformación.
- **b)** Utilizar siempre rectificadores de media onda.
- **c)** Utilizar reguladores lineales.
- **d)** Todos los anteriores.

2 Un limitador de intensidad en la fuente:
- **a)** Protege a la fuente y los componentes del circuito.
- **b)** Permite alcanzar intensidades de alimentación elevadas.
- **c)** Evita que la tensión suba demasiado.
- **d)** Ninguna de las anteriores.

3 En un transformador:
- **a)** La corriente en el primario y el secundario son iguales.
- **b)** La tensión en el primario y el secundario son iguales.
- **c)** Respuestas *a* y *b*.
- **d)** Ninguna de las anteriores.

4 Un rectificador:
- **a)** Corrige desequilibrios en una señal eléctrica.
- **b)** Convierte corriente alterna en corriente continua.
- **c)** Elimina rizado de una señal filtrada.
- **d)** Estabiliza el nivel de tensión de una señal eléctrica.

5 Los rectificadores pueden ser:
- **a)** De media onda y de onda completa.
- **b)** De media onda y puente de diodos.
- **c)** De onda simple y onda doble.
- **d)** A condensador y a inductor.

6 Con cuales de estos rectificadores se producirá un mayor rizado en la carga, si el filtro es el mismo:
- **a)** De onda completa.
- **b)** Puente de diodos.
- **c)** De media onda.
- **d)** Los tres producirán el mismo rizado.

7 Un diodo zener:

a) Se utiliza como regulador, polarizado directamente.
b) Se utiliza como regulador, polarizado inversamente.
c) Se utiliza como rectificador polarizado directamente.
d) Respuestas *b* y *c*.

8 Las fuentes conmutadas:

a) Son más eficientes que las fuentes lineales.
b) Proporcionan una salida de corriente alterna.
c) No utilizan transformadores.
d) Tienen una salida de tensión dependiente de la carga.

7 Componentes para electrónica de potencia

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- ✓ Explicar la operación básica del diodo Shockley.
- ✓ Describir el funcionamiento del tiristor SCR, analizando alguna de sus posibles aplicaciones.
- ✓ Mostrar el funcionamiento básico de DIAC y TRIAC.
- ✓ Explicar los principios de operación del transistor monounión.

Dentro de los componentes que se utilizan en la electrónica de potencia, unos de los más importantes son los dispositivos de la familia de los tiristores. Son componentes que pueden conmutar entre un estado de conducción y un estado de bloqueo en el que no conducen corriente eléctrica. Sus aplicaciones son muy diversas: osciladores, rectificadores, controladores, convertidores, etc.

En este capítulo se estudiarán los principales dispositivos tiristores: el diodo Shockley, el tiristor SCR, los DIAC y los TRIAC. También se estudiará el transistor monounión, que aunque no es un tiristor se utiliza habitualmente en circuitos de disparo de tiristores.

7.1 DIODO SHOCKLEY

El **diodo Shockley** es un dispositivo semiconductor de dos terminales, ánodo y cátodo, formado por cuatro capas de material semiconductor con una estructura *pnpn*. En la Figura 7.1 se muestra la estructura interna del diodo Shockley y su símbolo.

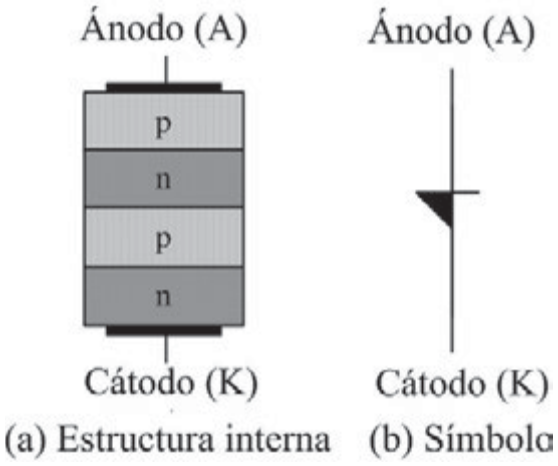


Figura 7.1. *Estructura interna y símbolo del diodo Shockley*

El diodo Shockley funciona como un interruptor en una sola dirección: del ánodo hacia el cátodo. El diodo permanece apagado hasta que el voltaje ánodo-cátodo alcanza un determinado valor positivo, llamado **voltaje de ruptura en directa** (V_{BO}) , momento en el cual el diodo empieza a conducir corriente y el voltaje ánodo-cátodo cae hasta un valor entre 1 V y 2 V. Una vez que el diodo está encendido, no se apagará hasta que la corriente que circula por él baje de un cierto valor llamado **corriente de mantenimiento** (I_H). En la Figura 7.2 se muestra la curva característica del diodo Shockley, donde se pueden ver las dos regiones de funcionamiento.

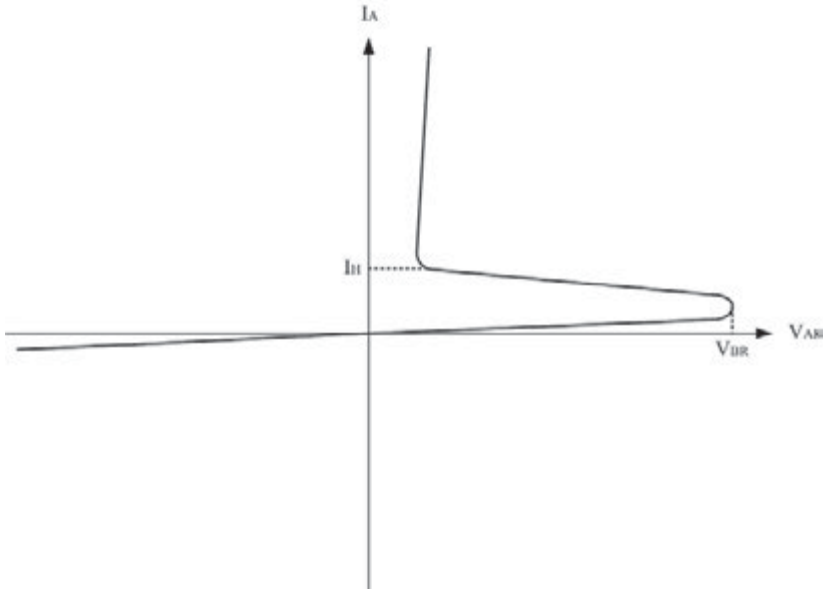


Figura 7.2. *Curva V/I del diodo Shockley*

EJEMPLO 7.1

Una aplicación a modo de ejemplo se muestra en la Figura 7.3(a). Este circuito es un oscilador de relajación, que funciona de la siguiente manera: cuando se conecta la alimentación del circuito el condensador, que está inicialmente descargado, comienza a cargarse hasta que alcanza un voltaje igual al voltaje de ruptura en directa del diodo. En ese momento el diodo comienza a conducir corriente y el condensador se descargará rápidamente a través del diodo. Cuando el condensador se descarga ya no entra intensidad en el diodo y éste pasa al estado de bloqueo, con lo que el condensador vuelve a comenzar la carga, repitiéndose el ciclo de carga y descarga de forma indefinida. En la Figura 7.3(b) se muestra la forma de onda del voltaje en el condensador.

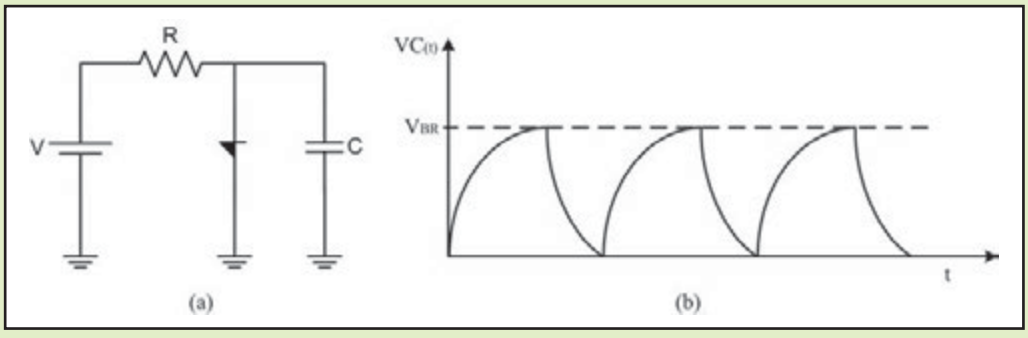


Figura 7.3. *Oscilador de relajación y voltaje en el condensador*

7.2 EL TIRISTOR

De forma general se consideran tiristores todos los dispositivos semiconductores de cuatro o más capas, como el diodo Shockley, el rectificador controlado de silicio (SCR), el DIAC, el TRIAC… que se estudiarán en este capítulo. Pero habitualmente se utiliza el término tiristor para referirse al SCR.

El **tiristor** o SCR es un dispositivo semiconductor de tres terminales muy utilizado en aplicaciones de electrónica de potencia. Internamente está formado por cuatro capas de material semiconductor de estructura *pnpn*, formando 3 uniones *pn* distintas. Sus terminales reciben el nombre de ánodo, cátodo y puerta. La Figura 7.4 muestra el símbolo del tiristor, y una sección de las uniones *pn*.

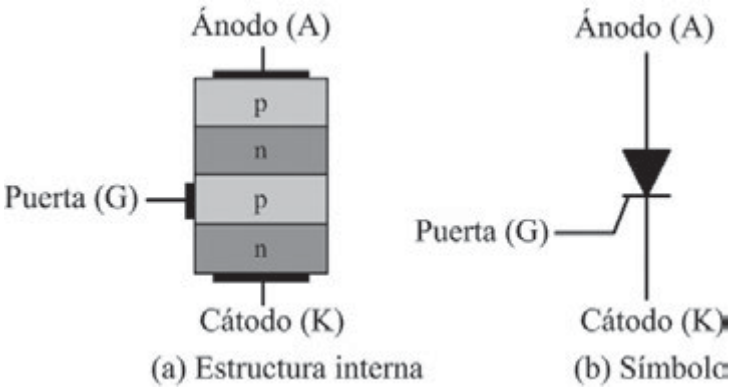


Figura 7.4. *Estructura interna y símbolo del tiristor*

¿SABÍAS QUE…?

El nombre de tiristor viene de la contracción de TIRatron-transISTOR.

7.2.1 FUNCIONAMIENTO

Dependiendo del voltaje ánodo-cátodo se dice que el tiristor está polarizado en directa si dicho voltaje es positivo, y polarizado en inversa si el voltaje es negativo. En polarización inversa el tiristor puede soportar voltajes muy elevados (centenas de voltios) antes de romperse.

¿SABÍAS QUE…?

Los tiristores pueden controlar la potencia de muchas tipos de cargas: desde simples lámparas, reguladores de voltaje hasta motores industriales. Los circuitos que usan CA o CD pueden emplear tiristores para control de potencia.

Aparte del modo de polarización, un tiristor puede estar en dos posibles estados: bloqueo y conducción. En el estado de bloqueo el tiristor no permite la circulación de corriente entre ánodo y cátodo: se comporta como un circuito abierto. Dependiendo de la polarización este estado de bloqueo recibe el nombre de bloqueo directo o bloqueo inverso.

En el estado de conducción, la corriente fluye libremente entre el ánodo y el cátodo y hay una pequeña caída de voltaje ánodo-cátodo del orden de 1V a 3V. En este estado la corriente que puede soportar el tiristor es muy elevada, del orden de las centenas de amperios. El estado de conducción solamente se puede dar si el tiristor está en polarización directa, por lo que este estado también recibe el nombre de conducción directa.

El paso del estado de bloqueo directo a conducción directa se denomina **disparo del tiristor**, y se puede conseguir de varias maneras:

- Aumentando mucho el voltaje ánodo-cátodo, hasta valores cercanos al voltaje de ruptura en directa. Este modo de activación puede resultar destructivo, por lo que se debe evitar.
- Aumentando muy rápidamente el voltaje ánodo-cátodo se consigue disparar el tiristor sin llegar al voltaje de ruptura.
- Aplicando una corriente de entrada al terminal de puerta se dispara el tiristor. Una vez disparado, no es necesario mantener la corriente en la puerta. Esta es la forma habitual de disparar un tiristor.

El funcionamiento del tiristor sin tener en cuenta el terminal de puerta es muy similar al del diodo Shockley. El terminal de puerta permite una forma adicional de pasar el dispositivo al estado de conducción.

En la Figura 7.5 se muestra la curva voltaje-intensidad del tiristor. En ella se puede ver el disparo por corriente en la puerta (línea punteada) y el disparo cuando se aumenta el voltaje ánodo-cátodo hasta llegar al voltaje de ruptura. En la figura también se muestra la **corriente de enganche** I_L, que es la corriente mínima que debe entrar por el ánodo para que el tiristor se mantenga en el estado de conducción inmediatamente después de anular la corriente de puerta que produjo el disparo. También se muestra la **corriente de mantenimiento** I_H, que es la corriente mínima que debe entrar por el ánodo para que el tiristor una vez disparado se mantenga en estado de conducción.

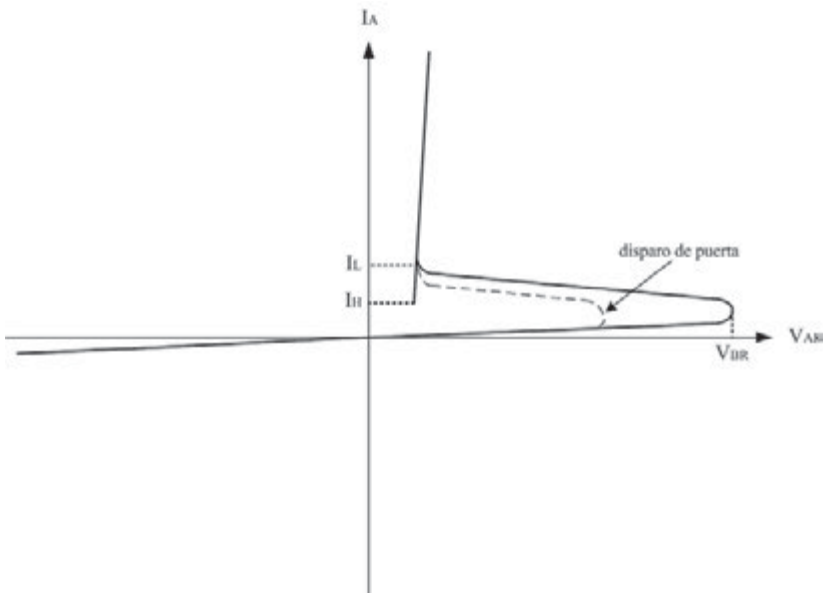


Figura 7.5. *Curva V/I del tiristor*

¿SABÍAS QUE...?

En inglés se dice:
- Tiristor: *thyristor*.
- Triac: *triode ac switch*.
- Diac: *diode alternating current*.
- Circuito de disparo: *trigger circuit*.
- Polarización: *polarity*.

7.2.2 CIRCUITOS DE DISPARO

Como se explicó en el apartado anterior, la forma normal de disparar un tiristor es haciendo que a través de la puerta entre una corriente determinada durante un tiempo mínimo determinado, datos que generalmente son proporcionados por la hoja de características del dispositivo.

El circuito básico de disparo de un tiristor se muestra en la Figura 7.6. Cuando se acciona el pulsador S_1, se produce una corriente de entrada por el terminal de puerta que hará que el tiristor pase al estado de conducción. Una vez soltado el pulsador, el tiristor se mantiene en el estado de conducción.

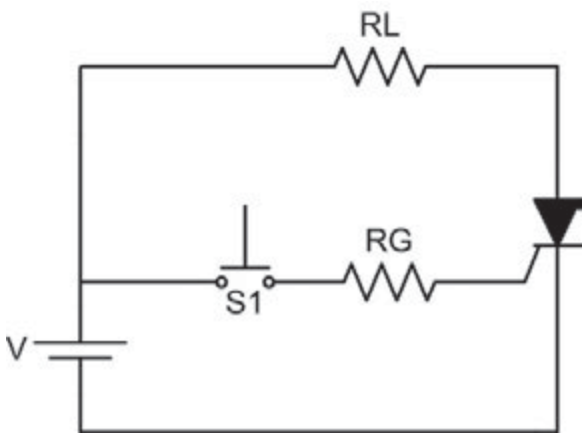


Figura 7.6. *Circuito de disparo para un tiristor*

7.2.3 CONMUTACIÓN NATURAL Y FORZADA

Al proceso de pasar del estado de conducción al estado de bloqueo se le denomina conmutación.

Cuando el voltaje de entrada del tiristor es de corriente alterna, la corriente que circula por el tiristor pasa por el valor cero y aparece un voltaje inverso ánodo-cátodo. El tiristor pasa al estado de bloqueo de forma natural, debido al comportamiento del voltaje de alimentación.

Si se desea conmutar el tiristor de forma forzada, se necesita algún tipo de circuito auxiliar que permita hacerlo. Las opciones de **conmutación forzada** son variadas y dependen de la aplicación, pero se pueden resumir en dos estrategias: hacer que la corriente de ánodo sea menor que la corriente de mantenimiento del tiristor, o bien producir una corriente inversa del cátodo hacia el ánodo polarizando el tiristor en inversa. En la Figura 7.7 se muestran de forma simplificada las dos opciones. En a) se utiliza una rama para desviar la corriente del ánodo hacia tierra cuando se cierra el pulsador S_1. En b) se utiliza una batería en paralelo con el tiristor que lo polariza en inversa cuando se cierra el pulsador S_1.

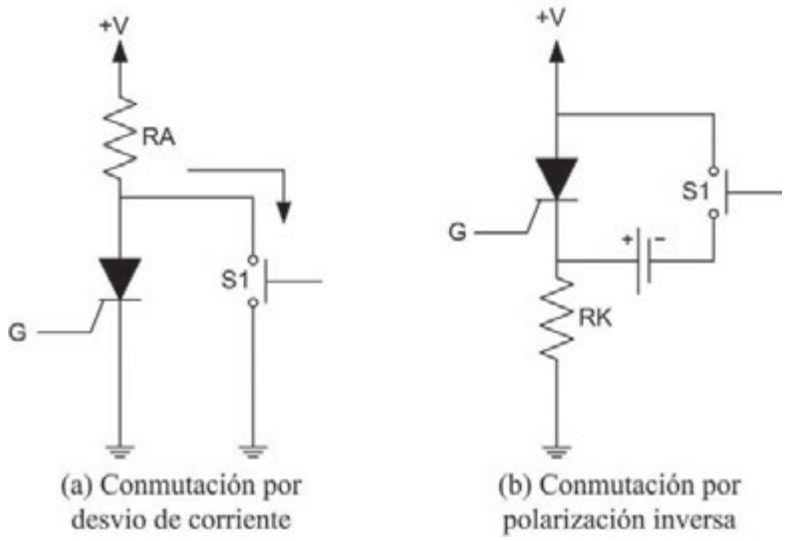


Figura 7.7. *Conmutación del tiristor por desvío de corriente a), y por polarización inversa b).*

7.2.4 APLICACIÓN EN RECTIFICADORES

En rectificación de señales se pueden utilizar tiristores de forma similar a como se usan los diodos, pero con el añadido de que al poder controlar el disparo del tiristor se puede controlar el ángulo o fase de rectificación. Un tiristor en estado de conducción es equivalente a un diodo convencional, así el circuito de la Figura 7.8 se comportará como el rectificador de media onda con diodo que se presentó en el capítulo 3, siempre que el tiristor esté en estado de conducción.

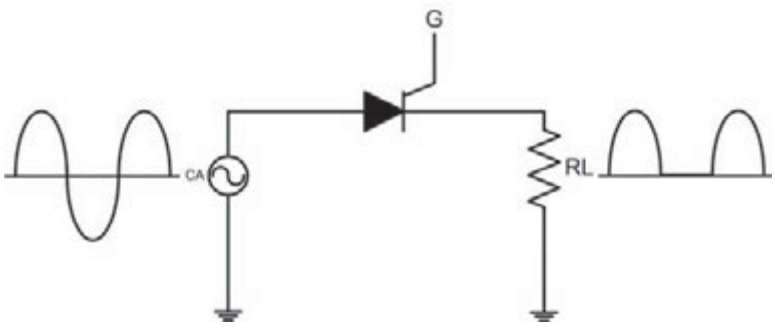


Figura 7.8. *Rectificador de media onda con tiristor*

Un circuito un poco más complejo permite modular el porcentaje del semiciclo positivo de la señal de entrada que es rectificado. La Figura 7.9 muestra un rectificador de media onda con control de fase. El diodo D_1 es el responsable de proporcionar la corriente necesaria para disparar el tiristor T_1, en función del valor del potenciómetro R_2. En a) el potenciómetro R_2 está en su valor máximo y el diodo D_1 comenzará a conducir casi al inicio del semiciclo positivo de la entrada disparando al tiristor, por lo que habrá corriente en la carga R_L durante todo el semiciclo positivo. Cuando llega el semiciclo negativo el tiristor conmuta de forma natural y se bloquea. En b) R_2 toma un valor más pequeño y por tanto el diodo D_1 no comenzará a conducir hasta que el valor de entrada sea más alto, por lo que el disparo del tiristor se produce más tarde y la corriente a través de la carga solo coincidirá con una parte del semiciclo positivo de la entrada.

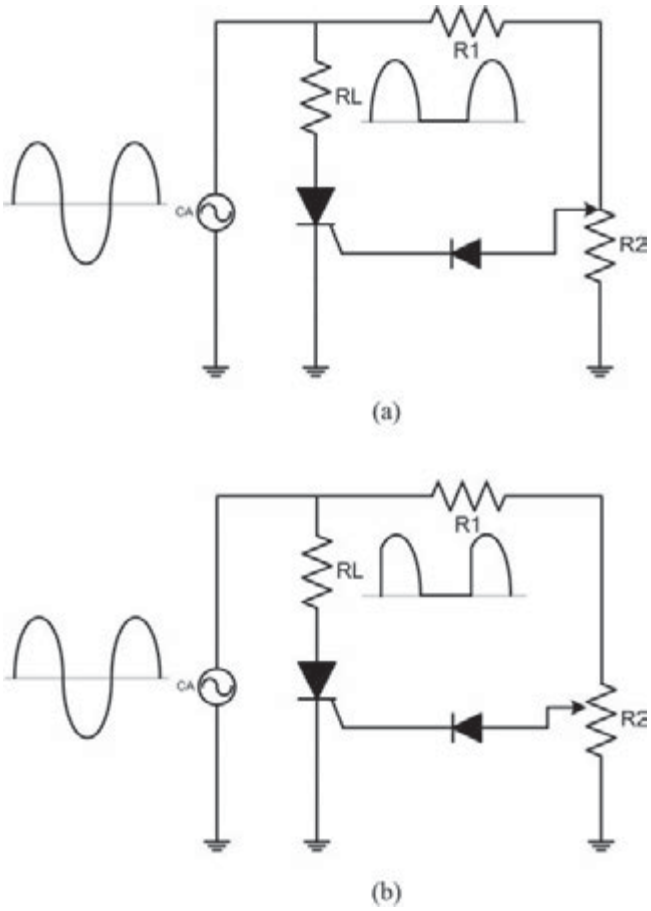


Figura 7.9. *Rectificador de media onda con control de fase*

PRÁCTICA 7.1

FUNCIONAMIENTO DE UN TIRISTOR

En esta actividad se montará un circuito para comprobar el funcionamiento de un tiristor, conmutándolo entre los estados de conducción y corte.

El material necesario para esta actividad es:

- ✓ 1 fuente de alimentación de 12 V.
- ✓ 1 SCR 2N3873.
- ✓ 2 resistencias de 100 Ω de 1 W. Si no se dispone de resistencias de 1 W se pueden utilizar 2 de 200 Ω y 0.5 W en paralelo.
- ✓ 1 diodo led.
- ✓ 2 pulsadores.

Monte el circuito de la Figura 7.10. Preste atención a la polaridad del SCR.

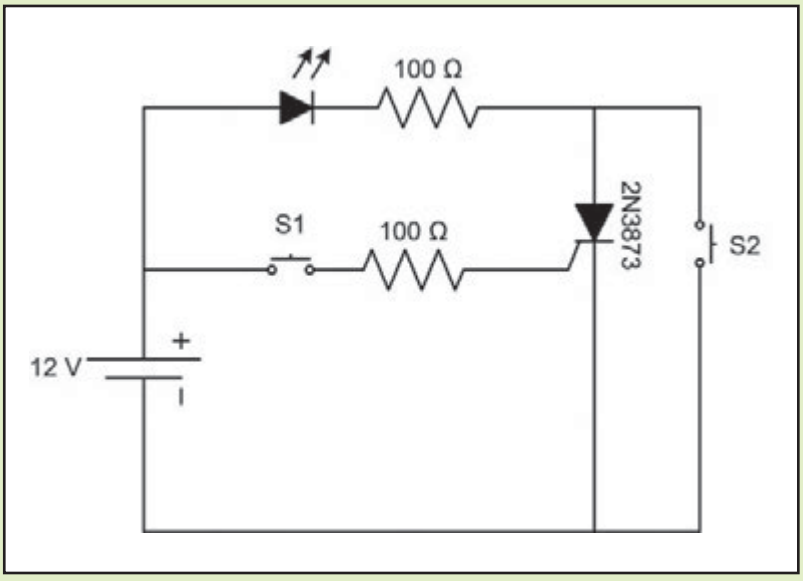


Figura 7.10. *Montaje con SCR*

Una vez montado el circuito se puede disparar el SCR mediante una breve pulsación en S1. Con el SCR disparado, circula corriente por el LED, por lo que se iluminará. El SCR permanecerá en el estado de conducción hasta que la corriente que circula por el baje del umbral. Para conseguir esto último se puede utilizar el pulsador S2: una breve pulsación en S2 hará que toda la corriente se desvíe por el pulsador y el SCR pase al estado de corte, con lo cual ya no circulará corriente por el LED y se apagará.

ACTIVIDADES 7.1

¿Qué características deben tenerse en cuenta a la hora de elegir uno u otro tipo de tiristor?

¿SABÍAS QUE...?

Los criterios a la hora de elegir un modelo de tiristor suelen ser la tensión directa de disparo, la intensidad de corriente, la sensibilidad y la velocidad de conmutación.

¿SABÍAS QUE...?

En función de las características que tengan, pueden ser clasificados en tiristores sensibles, tiristores de frecuencia industrial, el darlistor, tiristores rápidos, tiristor de puerta doble, el fototiristor y el tiristor complementario.

7.3 DIACS Y TRIACS

El DIAC y el TRIAC son dispositivos semiconductores de la familia de los tiristores, y a diferencia del diodo Shockley y del SCR, son capaces de conducir corriente en ambos sentidos.

7.3.1 EL DIAC

El **DIAC** es un dispositivo simétrico de dos terminales, ánodo 1 y ánodo 2 (al ser simétrico ya no tiene sentido hablar de ánodo y cátodo). La Figura 7.11 muestra su estructura interna y símbolo.

¿SABÍAS QUE...?

El funcionamiento del DIAC es equivalente al de dos diodos Shockley conectados en paralelo en sentidos opuestos.

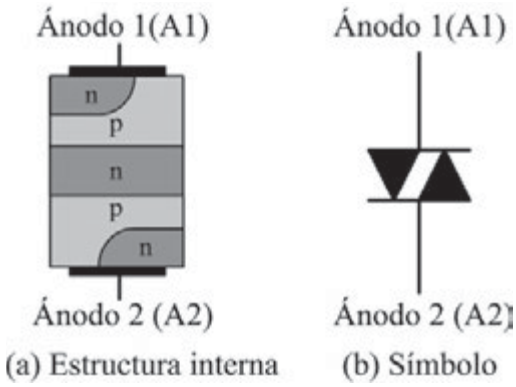


Figura 7.11. *Estructura interna y símbolo del DIAC*

Para voltajes de polarización bajos, tanto positivos como negativos, el DIAC no conduce corriente y está en el estado de bloqueo. Cuando el voltaje de polarización alcanza un determinado valor, que suele estar en torno a los 30 V, el DIAC se dispara y pasa al estado de conducción, permitiendo el paso de corriente. La Figura 7.12 muestra la curva característica del DIAC.

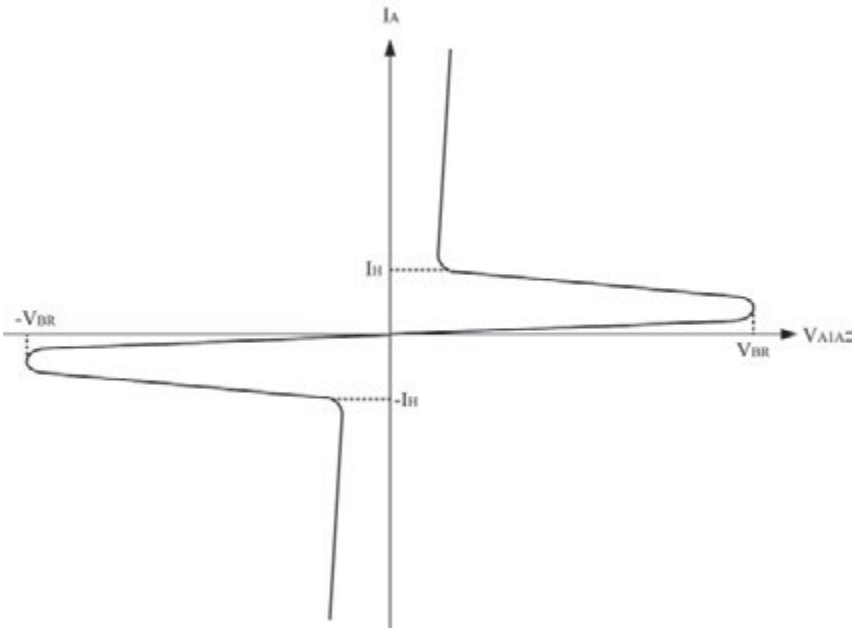


Figura 7.12. *Curva V/I del DIAC*

Los DIAC no están pensados para soportar mucha corriente y se usan principalmente para disparar otros componentes como tiristores SCR o TRIAC.

PRÁCTICA 7.2

DISPARO DEL DIAC

En esta actividad se medirán el voltaje de ruptura (V_{BR}) de un DIAC y su corriente de mantenimiento (I_H).

El material necesario para esta actividad es:

- ✓ 1 fuente de alimentación de 25 ó 30 V. Se pueden utilizar dos fuentes de menor voltaje conectadas en serie.
- ✓ 1 DIAC 1N5758.
- ✓ 1 resistencia de 1 KΩ de 1 W. Si no se dispone de resistencias de 1 W, se pueden utilizar dos resistencias de 2 KΩ de 0.5 W en paralelo.
- ✓ 2 multímetros, uno configurado como voltímetro y el otro como amperímetro.

Monte el circuito de la Figura 7.13. El DIAC se puede conectar en cualquier sentido, ya que es simétrico.

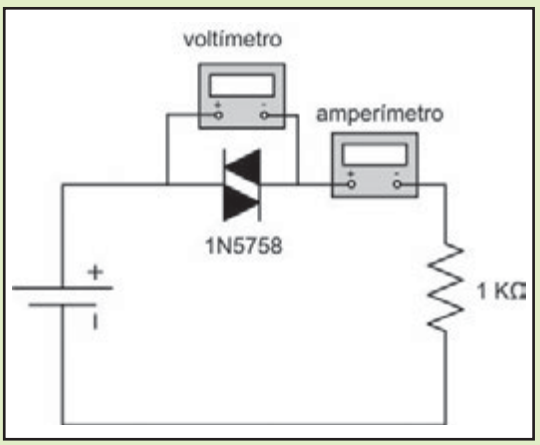


Figura 7.13. *Montaje con DIAC*

Una vez montado el circuito, encienda la fuente de alimentación y comience a aumentar lentamente su voltaje (por ejemplo de 1 en 1 Voltios), y mida para cada paso el voltaje en el DIAC. El voltaje del DIAC debería ir aumentando a medida que se aumenta el voltaje de la fuente.

Llegará un momento que al aumentar el voltaje de la fuente el DIAC se disparará y su voltaje caerá rápidamente. El voltaje en el DIAC justo antes de que se produzca el disparo es V_{BR}.

Una vez que el DIAC se ha disparado y se ha anotado el valor de V_{BR} se pasará a medir la corriente de mantenimiento (I_H). Para ello se irá disminuyendo poco a poco el voltaje de la fuente de alimentación, controlando el voltaje que hay en el DIAC y la intensidad que circula por el. El voltaje en el DIAC será bajo y cambiará poco a poco, hasta que llegue un momento en que cambie bruscamente el voltaje del DIAC para ser aproximadamente igual al de la fuente de alimentación. La corriente que circulaba por el circuito justo antes de este cambio brusco es I_H.

Puede probar a realizar las mismas medidas conectando el DIAC al revés, y así comprobar que es simétrico.

ACTIVIDADES 7.2

- Busca en Internet aplicaciones de los DIAC.

7.3.2 EL TRIAC

El **TRIAC** es un dispositivo simétrico de 3 terminales: ánodo 1, ánodo 2 y puerta. Su estructura y símbolo se muestran en la Figura 7.14.

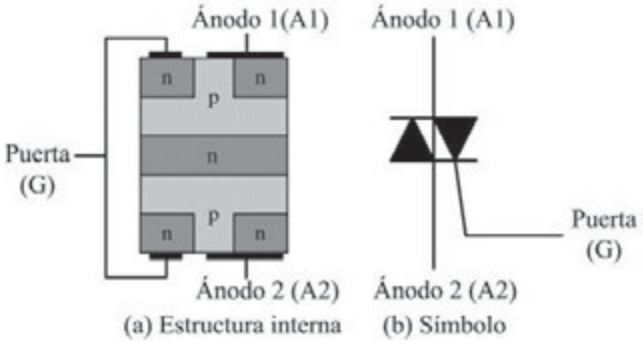


Figura 7.14. *Estructura interna y símbolo del TRIAC*

Su funcionamiento es muy similar al tiristor SCR, pero además permite que la corriente circule en los dos sentidos, dependiendo de la polaridad del voltaje entre sus terminales A_1 y A_2. Básicamente se puede concebir como dos tiristores conectados en paralelo de forma opuesta, y que comparten el terminal de puerta. En el estado de bloqueo el TRIAC no conduce corriente hasta que se dispara mediante un pulso de corriente en el terminal de puerta. Una vez disparado, el TRIAC permanece en el estado de conducción mientras la corriente que lo atraviesa esté por encima de la corriente de mantenimiento I_H. En la Figura 7.15 se muestra la curva característica de voltaje-intensidad del TRIAC.

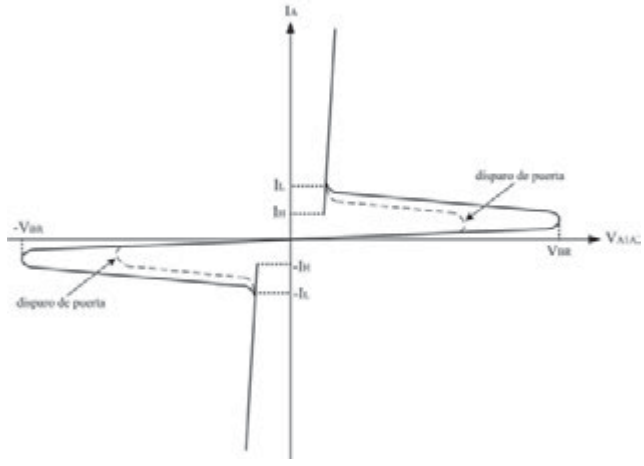


Figura 7.15. *Curva V/I del TRIAC*

El TRIAC se utiliza en aplicaciones de control de fase, permitiendo mediante el control del disparo variar el porcentaje de la señal de entrada que llega a la carga, con lo que se puede controlar la cantidad de potencia de la señal de entrada que se entrega a la carga. En la Figura 7.16 se muestra un circuito de control de fase mediante TRIAC. Los diodos D_1 y D_2 controlan el disparo del TRIAC en el semiciclo positivo y negativo respectivamente de la señal de entrada, proporcionando un pulso de corriente para disparar el TRIAC. La resistencia variable R_1 permite establecer el punto de cada semiciclo en el que se dispara el TRIAC.

En aplicaciones de control de fase es necesario que el TRIAC pase al estado de bloqueo al final de cada semiciclo de la señal de entrada, cosa que sucede de forma natural: al acercarse la señal de entrada al final del semiciclo su voltaje será pequeño por lo que la corriente que atraviesa el TRIAC caerá por debajo de la corriente de mantenimiento I_L, produciéndose la conmutación del TRIAC al estado de bloqueo.

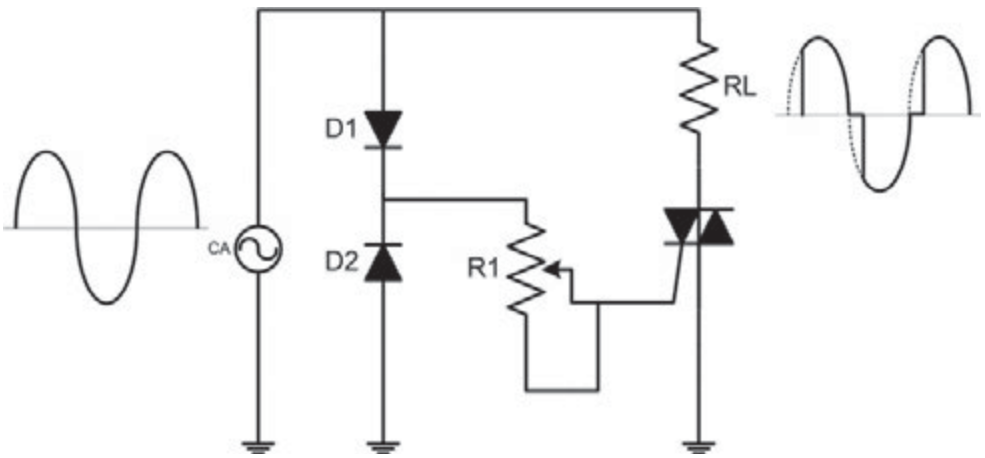


Figura 7.16. *Control de potencia mediante TRIAC y diodos*

En la Figura 7.17 se muestra una aplicación de control de potencia utilizando un DIAC para disparar un TRIAC. El funcionamiento del circuito se basa en la carga del condensador C, que se utiliza para disparar el DIAC. El valor de la resistencia variable R_1 es mucho mayor que la carga R_L.

Suponiendo que inicialmente están bloqueados tanto el DIAC como el TRIAC, cuando comienza el semiciclo positivo de la señal de entrada el condensador comenzará a cargarse con una constante de tiempo que depende del valor de la resistencia R_1. Cuando el voltaje en el condensador alcanza el valor del voltaje de disparo del DIAC, éste se dispara y el condensador comienza a descargarse a través de él produciendo un impulso de corriente que disparará el TRIAC. A partir de ese momento prácticamente todo el voltaje de entrada cae en la carga R_L. Cuando el voltaje de entrada se haga pequeño al acercarse al final del semiciclo, la corriente que atraviesa el TRIAC caerá por debajo de la corriente de mantenimiento, cortándose el TRIAC y volviendo a cargarse el condensador en el siguiente semiciclo de la entrada. La resistencia R_1 permite ajustar la cantidad de potencia que se entrega a la carga, ya que su valor influye en la velocidad de carga del condensador, permitiendo ajustar el tiempo de disparo del DIAC.

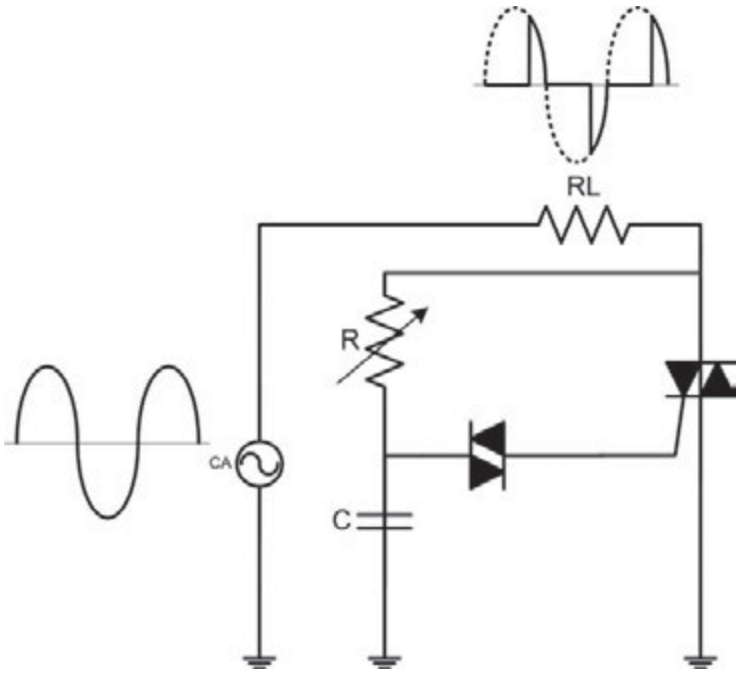


Figura 7.17. *Control de potencia mediante TRIAC y DIAC*

¿SABÍAS QUE...?

La principal diferencia entre los dos ejemplos que se han presentado es que en el primero de ellos solamente se puede controlar el disparo del TRIAC en la primera mitad de cada semiciclo, es decir entre 0º y 90º, mientras que en el segundo ejemplo el TRIAC se puede disparar en cualquier parte del semiciclo, es decir en cualquier punto entre 0º y 180º.

ACTIVIDADES 7.3

- Busca en Internet qué es un *dimmer*. ¿Se utiliza algún TRIAC para su funcionamiento?
- ¿Cuáles son las diferencias entre un tiristor, un DIAC y un TRIAC?
- Busca por Internet cuáles son los parámetros que definen un TRIAC y su definición (algunos de ellos serán la corriente de mantenimiento, la tensión de pico o el tiempo de encendido, entre otros).

7.4 EL TRANSISTOR UJT

El **transistor UJT** (*UniJunction Transistor*) o transistor monounión es un dispositivo semiconductor de tres terminales: emisor, base 1 y base 2, que internamente solo tiene una unión *pn*. Se utiliza principalmente en aplicaciones de osciladores y como dispositivo de disparo para tiristores. En la Figura 7.18 se muestra su estructura interna y su símbolo.

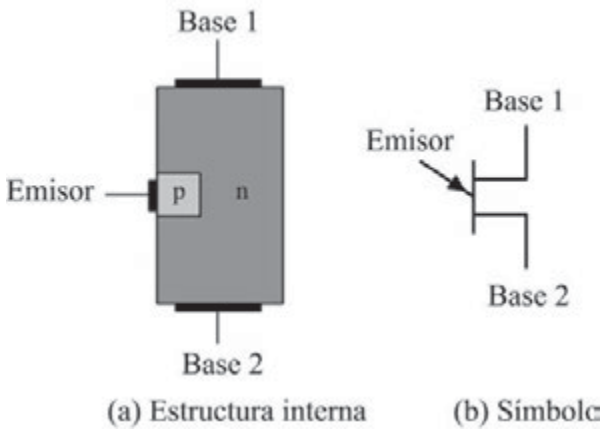


Figura 7.18. *Estructura interna y símbolo del transistor monounión*

En la Figura 7.19(a) se muestra el circuito equivalente del UJT, que ayudará a comprender el funcionamiento de este dispositivo. El diodo del circuito equivalente representa la unión *pn*, y las resistencias rb_1 y rb_2 representan la resistencia que presenta la barra de silicio entre el emisor y las bases 1 y 2 respectivamente.

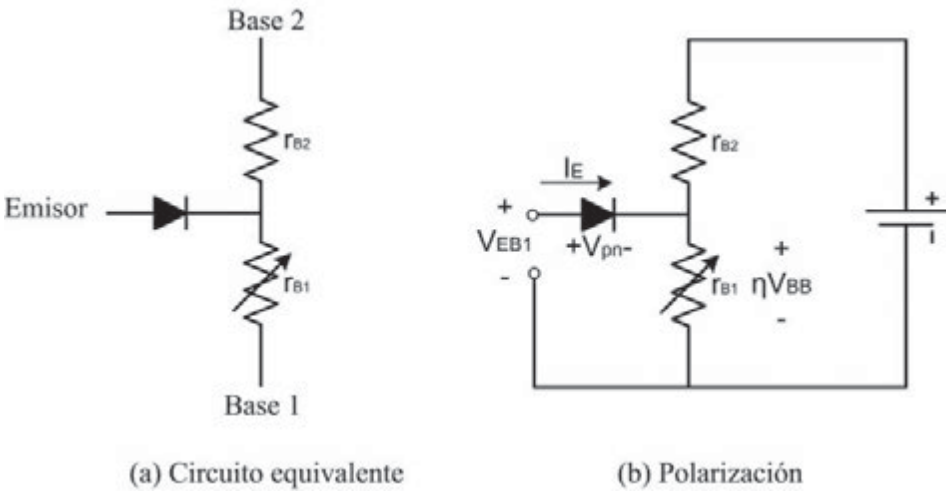


Figura 7.19. *Circuito equivalente y polarización del transistor monounión*

La suma de rb_1 y rb_2 es la resistencia total entre las bases y se denomina resistencia de interbase o r_{bb}. El valor de rb_1 varía de forma inversamente proporcional con la corriente de emisor, tomando valores entre varios KΩ y decenas de Ω. Cuando el dispositivo se polariza como se muestra en la Figura 6.17(b) rb_1 y rb_2 forman un divisor de tensión y el voltaje en rb_1 es

$$V_{rb_1} = \left(\frac{rb_1}{r_{bb}}\right) \cdot V_{BB}$$

La razón rb_1/r_{bb} se conoce como razón de espera del UJT, y es un parámetro que proporciona el fabricante del dispositivo:

$$\eta = \frac{rb_1}{r_{bb}}$$

Mientras el voltaje V_{EB1} sea menor que el voltaje en rb_1 más el voltaje de polarización del diodo (V_{pn}) no habrá corriente en el emisor ya que la union *pn* no está polarizada. El valor de V_{EB1} que hace que la unión *pn* se polarice en directa se denomina voltaje de punto de pico y es:

$$V_P = \eta \cdot V_{BB} + V_{pn}$$

Una vez que el voltaje V_{EB1} alcanza el valor de punto de pico comienza a entrar corriente por el emisor (I_E) y el UJT entra en una región que se conoce como región de resistencia negativa, ya que el voltaje V_{EB1} disminuye al aumentar la corriente I_E. Una vez que el UJT entra en la región de resistencia negativa, el voltaje V_{EB1} disminuye a medida que aumenta I_E, hasta llegar a un valor de intensidad de emisor que recibe el nombre de **punto de valle** (I_V). A partir de ese punto el voltaje V_{EB1} aumenta ligeramente a medida que aumenta I_E. La Figura 7.20 muestra la curva característica del UJT.

¿SABÍAS QUE...?

El punto valle es el punto para el cual el transistor entra en la región de saturación de su característica.

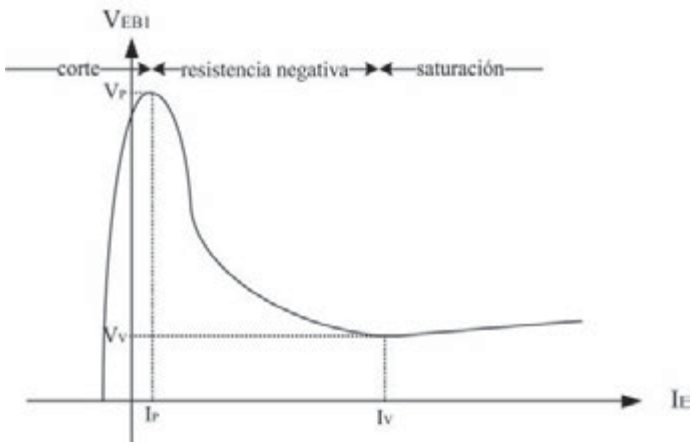


Figura 7.20. *Curva I/V del transistor monounión*

Una aplicación de los UJT es en el diseño de circuitos osciladores. La Figura 7.21(a) muestra un oscilador de relajación con UJT. Cuando se conecta la fuente de alimentación el condensador comienza a cargarse con una constante de tiempo R_1C, hasta que el condensador alcanza el voltaje de punto de pico del UJT. En ese momento el UJT entra en la región de resistencia negativa y el condensador comienza a descargarse a través de la unión *pn*, rb_1 y R_2. Cuando el voltaje del condensador llega al voltaje de punto de valle del UJT, éste se apaga y el condensador comienza de nuevo la carga. En la Figura 7.21 (b) se muestran las formas de onda del voltaje en el condensador y el voltaje en la resistencia R_2.

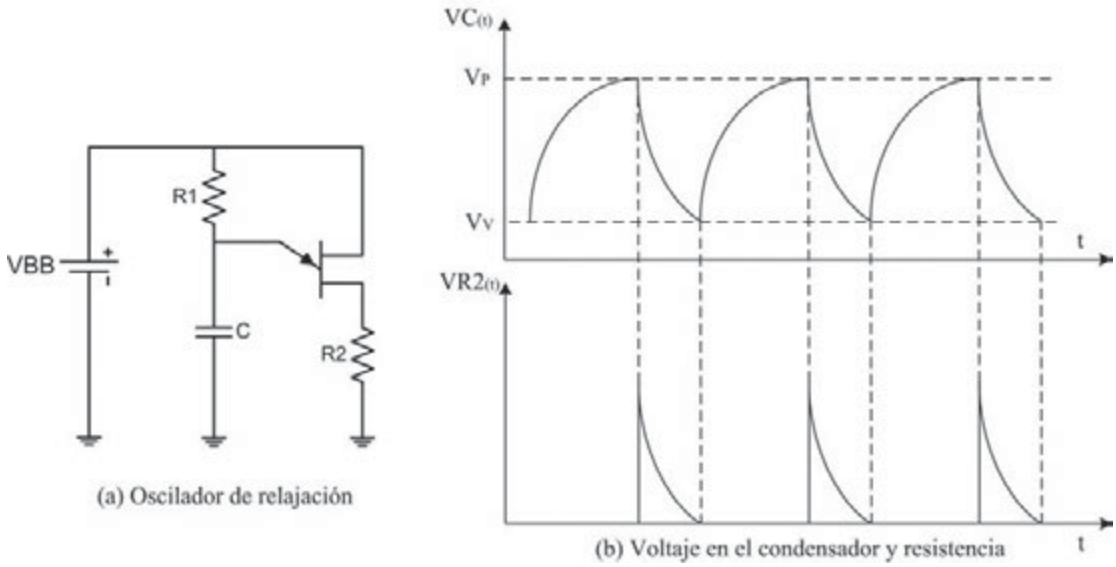


Figura 7.21. *Oscilador de relajación con UJT*

Para asegurar que el UJT se enciende y apaga correctamente en el circuito oscilador, la resistencia R_1 debe cumplir unas condiciones. En primer lugar R_1 no debería limitar la corriente de emisor en el punto de pico a un valor inferior a I_P. Para ello la caída de voltaje en R_1 en el punto de pico debe ser mayor que $I_P R_1$

$$V_{BB} - V_P > I_P \cdot R_1 \Rightarrow R_1 < \frac{V_{BB} - V_P}{I_P}$$

Para el apagado del UJT en el punto valle, R_1 debe ser suficientemente grande para que I_E pueda decrecer por debajo de I_V. Esto significa que en el punto valle el voltaje en R_1 tiene que ser menor que $I_V R_1$.

$$V_{BB} - V_V < I_V \cdot R_1 \Rightarrow R_1 > \frac{V_{BB} - V_V}{I_V}$$

De manera que para que el oscilador de relajación funcione correctamente, R_1 debe cumplir:

$$\frac{V_{BB} - V_P}{I_P} > R_1 > \frac{V_{BB} - V_V}{I_V}$$

RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se han presentado los distintos componentes de conmutación usados en electrónica de potencia.

Los diodos Shockley y los DIAC son dispositivos de dos terminales que se encienden cuando se supera un determinado voltaje, y se apagan cuando la corriente baja por debajo de un determinado nivel llamado corriente de mantenimiento. Ambos componentes son similares, siendo la única diferencia que los diodos Shockley solo conducen corriente en un sentido y los DIAC conducen corriente en ambos sentidos.

Los tiristores y los TRIAC son dispositivos de tres terminales. Se parecen a los diodos Shockley y a los DIAC, pero con el añadido de poder encenderlos haciendo uso del terminal de puerta. El SCR solo conduce corriente en un sentido y el TRIAC conduce corriente en ambos sentidos.

El transistor monounión es un dispositivo de tres terminales que se utiliza como elemento de disparo para SCR y TRIAC, y también en circuitos osciladores. Se caracteriza por tener una zona de funcionamiento de resistencia negativa en la que disminuye el voltaje a medida que aumenta la corriente que entra en el dispositivo a través del terminal de emisor.

EJERCICIOS PROPUESTOS

1. En el circuito de la Figura 7.22 el tiristor está en estado de conducción. ¿A qué valor habría que ajustar la resistencia variable R para que el tiristor se apague? Suponga que la caída de tensión en conducción del tiristor es 2 V, y que I_H = 20 mA.

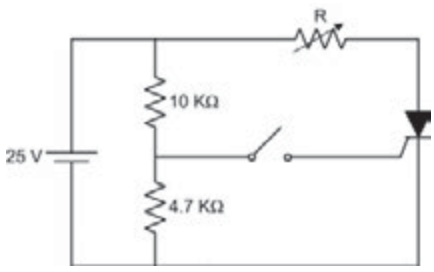


Figura 7.22. *Circuito para el ejercicio 1*

2. Para el circuito de la Figura 7.23, dibuje la forma de onda del voltaje en la resistencia. Suponga que la caída de tensión en conducción del tiristor es 2 V, y que I_H = 20 mA.

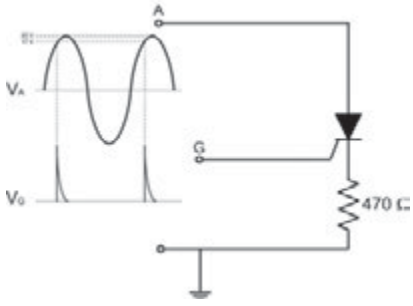


Figura 7.23. *Circuito para el ejercicio 2*

3. Para el circuito de la Figura 7.24, dibuje la forma de onda del voltaje en la resistencia. Suponga que la caída de tensión en conducción del TRIAC es ±1.5 V, que I_H = ±50 mA y V_{BR} = ±30 V.

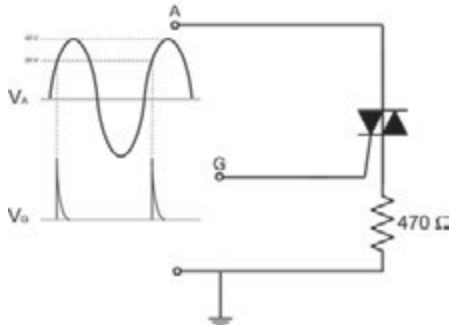


Figura 7.24. *Circuito para el ejercicio 3*

4. En un UJT, rb_1 = 2.5 KΩ y rb_2 = 5.5 KΩ. Determine la razón de espera intrínseca. ¿Qué valor tendrá V_P si se polariza el UJT con una diferencia de voltaje entre las bases de 12 V?

TEST DE CONOCIMIENTOS

1 Un diodo Shockley se enciende cuando el voltaje ánodo-cátodo:
- **a)** Supera 0.7 V.
- **b)** Supera le voltaje de compuerta.
- **c)** Supera el voltaje de ruptura en directa.
- **d)** Ninguna de las anteriores.

2 Un diodo Shockley se puede apagar:
- **a)** Reduciendo la corriente por debajo de cierto valor.
- **b)** Desconectando el voltaje del ánodo.
- **c)** *a* y *b* son correctas.
- **d)** Ninguna de las anteriores.

3 Un tiristor SCR tiene:
- **a)** Dos uniones *pn*.
- **b)** Tres uniones *pn*.
- **c)** Cuatro uniones *pn*.
- **d)** Dos terminales.

4 Un tiristor SCR se diferencia de un diodo Shockley porque:
- **a)** No tiene cuatro capas.
- **b)** No es posible encenderlo y apagarlo.
- **c)** Tiene un terminal de puerta.
- **d)** Ninguna de las anteriores.

5 La corriente de mantenimiento IH de un tiristor SCR es:
- **a)** La corriente mínima necesaria para disparar el tiristor.
- **b)** La corriente mínima de puerta para apagar el tiristor.
- **c)** La corriente mínima necesaria para que el tiristor se mantenga en el estado de conducción.
- **d)** Ninguna de las anteriores.

6 Un DIAC es:

a) Como un tiristor SCR pero sin terminal de puerta.
b) Como un diodo Shockley pero con terminal de puerta.
c) Como dos diodos Shockley conectados en paralelo en direcciones opuestas.
d) Ninguna de las anteriores.

7 Un TRIAC es:

a) Como un tiristor SCR pero puede conducir corriente en ambos sentidos.
b) Como un DIAC pero con un terminal de puerta.
c) *a* y *b* son correctas.
d) Ninguna de las anteriores.

8 Un UJT tiene:

a) Tres terminales y 3 uniones *pn*.
b) Tres terminales y una unión *pn*.
c) Dos terminales y una unión *pn*.
d) Ninguna de las anteriores.

8 Amplificadores operacionales

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- ✓ Comprender los principios básicos de funcionamiento del amplificador operacional.
- ✓ Estudiar las configuraciones básicas de circuitos con amplificador operacional.
- ✓ Entender el funcionamiento de los filtros activos basados en amplificador operacional.
- ✓ Estudiar los circuitos convertidores intensidad-tensión y tensión-intensidad.

Los primeros amplificadores operacionales se utilizaban principalmente para realizar operaciones como suma, resta, integración y derivación, motivo por el cual recibieron el nombre de “operacionales”. Actualmente es uno de los circuitos integrados más comúnmente usados en electrónica analógica.

En la Figura 8.1 se muestra el símbolo común del amplificador operacional. Consta de dos entradas, llamadas **entrada inversora** (-) y **entrada no inversora** (+). Además consta de dos terminales de alimentación +V y -V, que por razones prácticas no se suelen dibujar en los esquemáticos de circuitos.

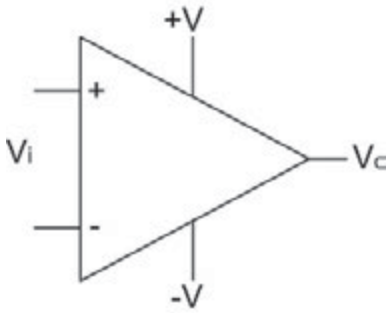


Figura 8.1. *Símbolo y terminales del amplificador operacional*

En un **amplificador operacional** el terminal de salida tiene un voltaje (V_i) igual a la ganancia del amplificador operacional (A_v) multiplicada por el voltaje de entrada del operacional (V_i), considerado este voltaje de entrada como la diferencia de voltaje entre la entrada no inversora y la entra inversora:

$$V_o = A_v \cdot V_i$$

Idealmente, un amplificador operacional tiene las siguientes características:

- ✓ Ganancia de voltaje infinita.
- ✓ Impedancia de entrada infinita.
- ✓ Ancho de banda infinito.
- ✓ Impedancia de salida nula.

En la Figura 8.2 se muestra la representación interna de un amplificador operacional ideal. Aunque los amplificadores operacionales reales no tienen estas características ideales, se acercan bastante a la idealidad, lo que permite utilizar unas técnicas para analizar el funcionamiento de circuitos con amplificador operacional muy sencillas, que se presentarán más adelante.

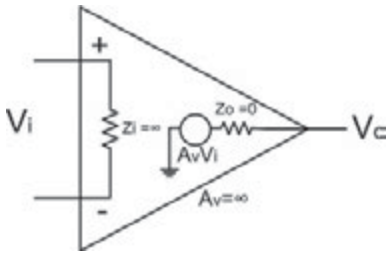


Figura 8.2. *Amplificador operacional ideal*

¿SABÍAS QUE...?

Se pueden encontrar amplificadores en equipos domésticos como los amplificadores de sonido y de vídeo.

ACTIVIDADES 8.1

- ¿En qué dispositivos domésticos o profesionales se encuentran amplificadores? Busca información en libros o en Internet si lo ves necesario.

8.1 EL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

Internamente un **amplificador operacional** está formado por dos o más etapas de un tipo de amplificador que se conoce como amplificador diferencial, por lo que antes de profundizar en el estudio de los amplificadores operacionales se presentarán los fundamentos de funcionamiento del amplificador diferencial.

En la Figura 8.3 se muestra un circuito básico de amplificador diferencial, formado por dos transistores idénticos, una resistencia de colector por cada transistor y una resistencia de emisor común a los dos transistores.

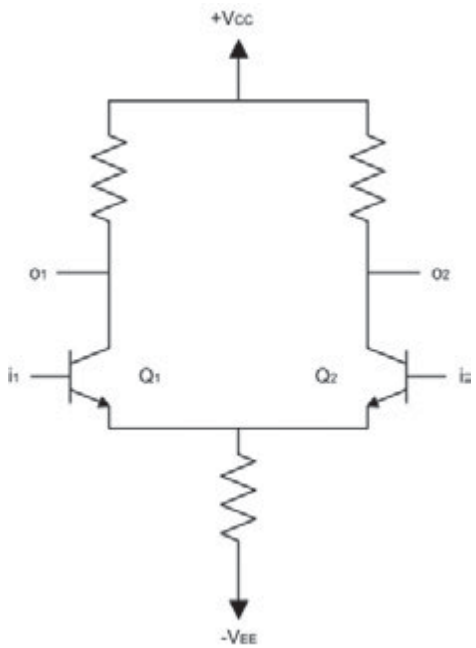


Figura 8.3. *Amplificador diferencial básico.*

Para explicar el funcionamiento del amplificador diferencial en corriente continua, se supondrá inicialmente que las dos entradas están conectadas a tierra, para posteriormente explicar que sucede cuando una de las entradas se mantiene a tierra y en la otra se introduce un determinado voltaje.

Suponiendo que inicialmente ambas entradas están conectadas a tierra (0 V), los emisores de ambos transistores estarán a -0.7 V. Como ambos transistores son idénticos, sus corrientes de emisor serán también idénticas. Estas dos corrientes de emisor se combinan a través de la resistencia de emisor, por tanto:

$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{I_{RE}}{2}$$

Siendo la intensidad por la resistencia de emisor:

$$I_{RE} = \frac{V_E - V_{EE}}{R_E}$$

Utilizando la aproximación de que la intensidad de colector es igual a la intensidad de emisor:

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_{RE}}{2}$$

Como las dos corrientes de colector son iguales y las resistencias de colector también son iguales:

$$V_{C1} = V_{C2} = V_{CC} - I_{C1} \cdot R_{C1}.$$

Si se aplica un voltaje V_B positivo en la entrada 1 (que es la base del transistor Q_1) manteniendo la entrada 2 a tierra, sucede que ese aumento de voltaje en la base de Q_1 hace que también aumente la corriente I_{C1} y también el voltaje de emisor hasta $V_E = V_B - 0.7$.

Este cambio en V_E hace que se reduzca la polarización en directa del transistor Q_2 por lo que disminuirá la corriente I_{C2}. El resultado global es que el aumento de I_{C1} produce un decremento de V_{C1}, y el decremento de I_{C2} produce un aumento de V_{C2}. Dada la simetría del amplificador diferencial, el análisis sería similar si la entrada 1 está a tierra y el voltaje V_B se coloca en la entrada 2.

Cuando el amplificador diferencial opera con señal puede hacerlo de 3 formas diferentes: entrada de terminal simple, entrada diferencial y entrada común, aunque basta con entender el modo de funcionamiento de terminal simple para comprender los otros dos por extensión.

El modo de entrada de terminal simple se da cuando una de las entradas se conecta a tierra y por la otra se introduce la señal a amplificar. El resultado es que en una de las salidas (la opuesta a la entrada) aparecerá la señal amplificada y por la otra salida aparecerá la señal amplificada y desfasada 180º. En la Figura 8.4 se muestra un ejemplo: si se introduce señal por la entrada 1 y se mantiene la entrada 2 a tierra, en la salida 1 se tiene la señal amplificada y desfasada 180º y en la salida 2 se tiene la señal amplificada. El funcionamiento es simétrico si se mantiene la entrada 1 a tierra y se introduce la señal por la entrada 2.

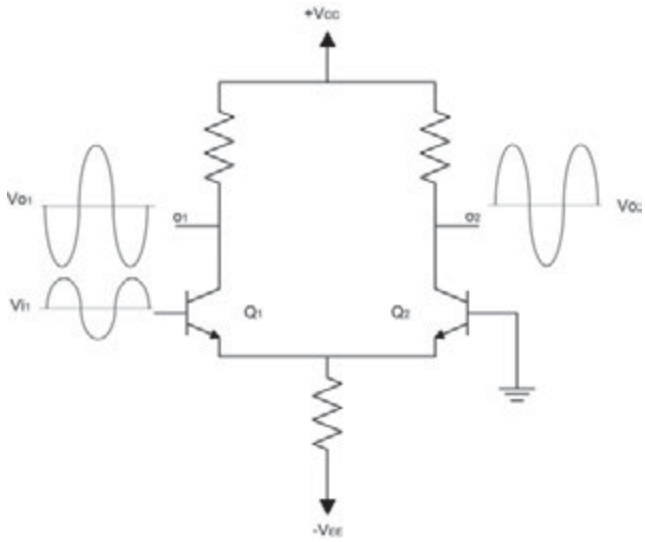


Figura 8.4. *Amplificador diferencial operando en modo de entrada de terminal simple*

El modo de entrada diferencial se da cuando en las dos entradas se aplican dos señales de polaridad opuesta (desfasadas 180º). Para comprender el funcionamiento con este tipo de entrada basta con considerar cada una de las entradas por separado como si fuese entrada de terminal simple y aplicar el principio de superposición. En la Figura 8.5 se muestra un ejemplo gráfico del funcionamiento en modo diferencial.

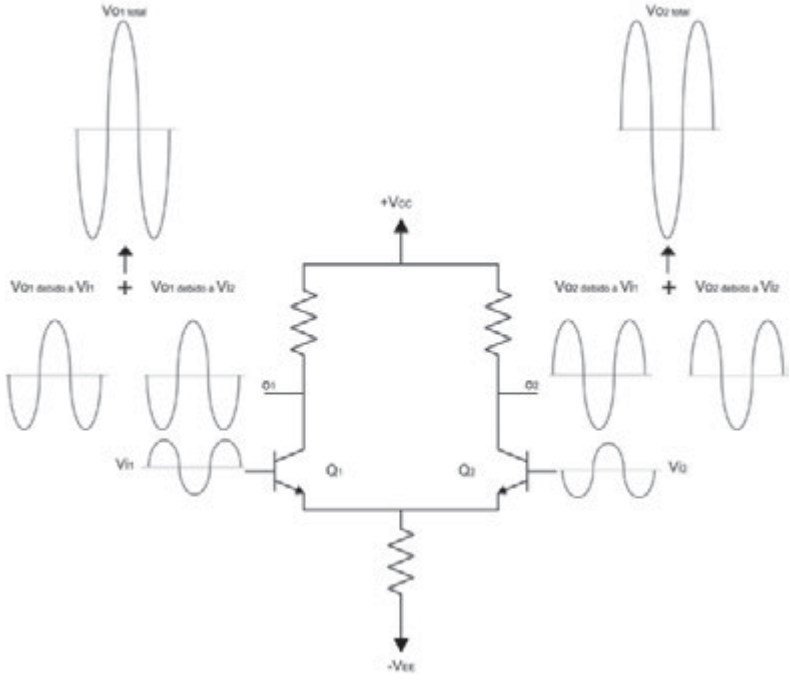


Figura 8.5. *Amplificador diferencial operando en modo de entrada diferencial*

El tercer modo de funcionamiento, entrada en modo común, se da cuando en las dos entradas se introduce la misma señal. Si se aplica el principio de superposición a cada entrada por separado, se puede ver que el resultado es que en cada salida se tendrá por una parte la señal amplificada y la misma señal amplificada pero desfasada 180º, por lo que la combinación de ambas dará como resultado 0 V. Es decir, la salida del amplificador diferencial cuando se introduce la misma señal en las dos entradas simultáneamente debe ser 0 V. En la Figura 8.6 se muestra un ejemplo gráfico de este funcionamiento.

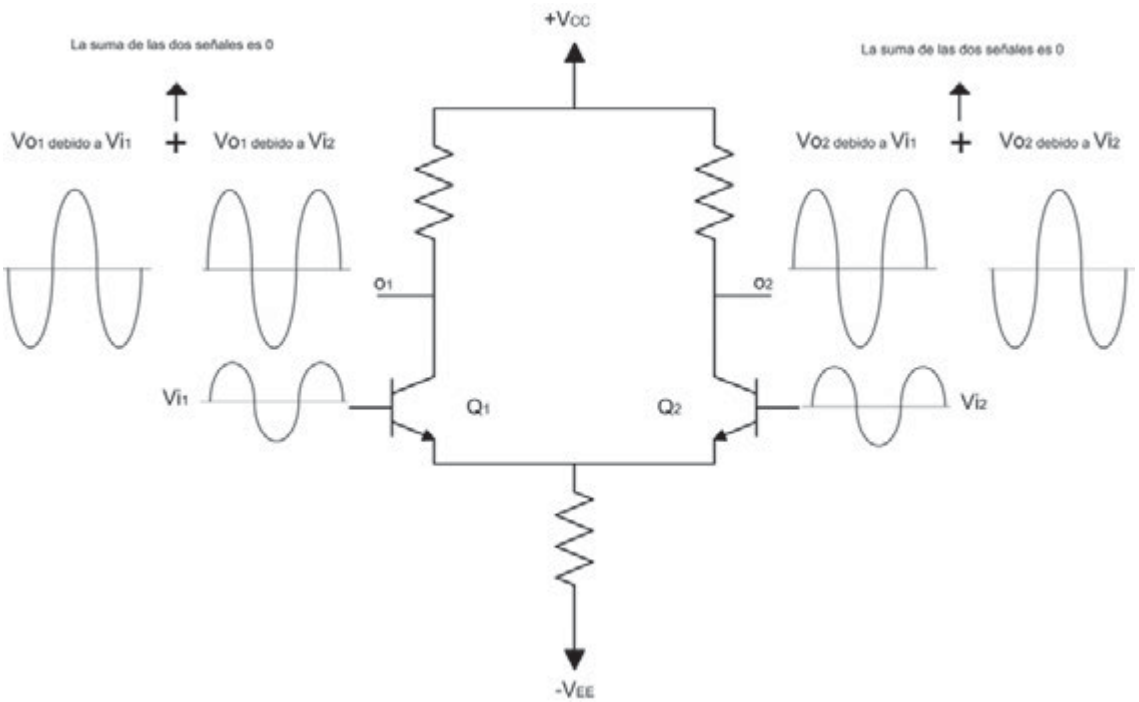


Figura 8.6. *Amplificador diferencial operando en modo de entrada común*

Este modo de funcionamiento no se usa realmente, pero su característica es importante ya que representa el grado de inmunidad al ruido del amplificador: si una señal de ruido aparece en los dos terminales no afectará a la salida, ya que al entrar en modo común se cancelará en la salida. En un amplificador real, debido a las pequeñas diferencias de fabricación de los transistores la salida no se cancela completamente cuando la entrada es en modo común. Existe un parámetro llamado razón de rechazo en modo común o RRMC que representa la capacidad del amplificador real para rechazar señales en modo común.

¿SABÍAS QUE...?

Para que un amplificador resulte útil debe trabaja en su zona lineal, ya que si está en saturación, la señal de salida se deformará.

8.2 CARACTERÍSTICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Como ya se comentó en la introducción del capítulo, un amplificador operacional tiene una serie de características ideales como impedancia de entrada infinita, ganancia infinita, etc. Un amplificador operacional real tiene unas características que no son ideales, pero que se pueden asumir como ideales a la hora de utilizar algunas técnicas para simplificar el análisis de circuitos basados en amplificador operacional.

8.2.1 IMPEDANCIAS DE ENTRADA Y SALIDA

La **impedancia de entrada** de un amplificador operacional es la resistencia total existente entre la entrada inversora y la entrada no inversora, como se muestra en la Figura 8.7. Los valores típicos de amplificadores reales están en el orden de los MΩ.

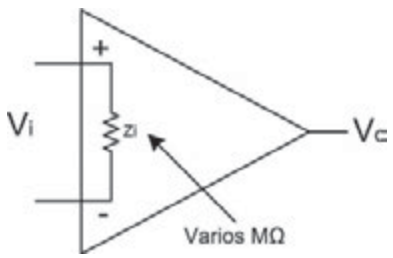


Figura 8.7. *Impedancia de entrada de un amplificador operacional*

La **impedancia de salida** de un amplificador operacional es la resistencia que hay entre el terminal de salida y tierra, como se muestra en la Figura 7.8. Los valores típicos para amplificadores reales están en el orden de las decenas de Ω.

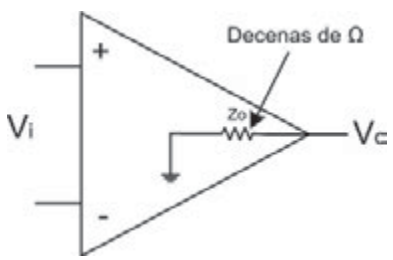


Figura 8.8. *Impedancia de salida de un amplificador operacional*

8.2.2 GANANCIA EN LAZO ABIERTO

La **ganancia** en lazo abierto de un amplificador operacional es la ganancia del amplificador cuando no hay ningún tipo de realimentación de la salida a la entrada. Los valores típicos van desde 50.000 hasta 200.000.

¿SABÍAS QUE...?

La ganancia de un amplificador con varias etapas en cascada se obtiene multiplicando las ganancias de cada una de ellas.

8.3 CIRCUITOS CON AMPLIFICADORES OPERACIONALES

8.3.1 REALIMENTACIÓN NEGATIVA

La **realimentación negativa** en un circuito con amplificador operacional se da cuando una parte del voltaje de salida del amplificador vuelve hacia la entrada inversora a través de un camino de realimentación, como se muestra en la Figura 8.9.

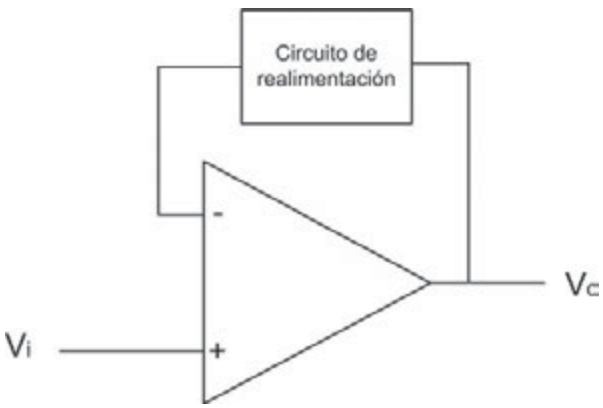


Figura 8.9. *Amplificador operacional en configuración de realimentación negativa*

Un circuito con amplificador operacional que no haga uso de realimentación negativa es muy probable que sature la salida al valor máximo o mínimo que puede dar el amplificador. Como ya se comentó en la introducción un operacional tiene dos entradas +V y –V, que se utilizan para alimentar el circuito integrado. Estos valores de +V y –V limitan el valor de voltaje máximo y mínimo que puede dar el operacional en la salida. Así, un operacional alimentado con +12 V y -12 V nunca podrá dar más de 12 V ni menos de -12 V a la salida (en realidad un poco menos de 12 y -12). Teniendo en cuenta las elevadas ganancias de los amplificadores operacionales es fácil que incluso para una entrada muy pequeña del orden de los milivoltios, la salida alcance el valor máximo. Por ejemplo, para el circuito de la Figura 8.10, suponiendo una ganancia del amplificador operacional de 200000, y un valor de 1mV en la entrada no inversora, la salida debería ser 200 V valor que no puede alcanzarse ya que el circuito está alimentado con ±12 V.

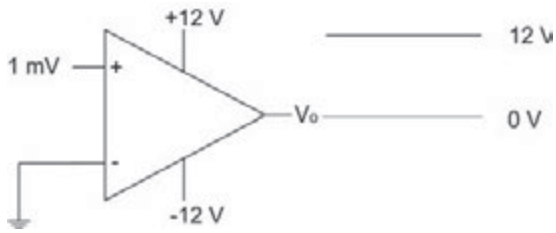


Figura 8.10. *Saturación del operacional*

La realimentación negativa permite ajustar la ganancia del amplificador para que no se sature su salida para el rango de valores de entrada que se desea utilizar. También permite modificar la impedancia de entrada, de salida y el ancho de banda.

En las siguientes secciones se explican distintas configuraciones de amplificadores que hacen uso de realimentación negativa.

ACTIVIDADES 8.2

- ¿Cuáles son las ventajas y las desventajas de la realimentación negativa?

8.3.2 CONFIGURACIÓN NO INVERSORA

Se dice que un amplificador operacional está en configuración no inversora cuando hay realimentación negativa y la entrada de señal se hace por la entrada no inversora. Un ejemplo de esta configuración se muestra en la Figura 8.11.

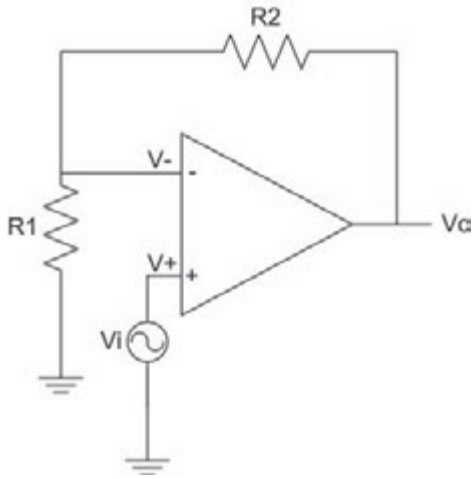


Figura 8.11. *Amplificador operacional en configuración no inversora*

Se define la ganancia en lazo cerrador para este amplificador como: $A_{LC} = \frac{V_o}{V_i}$.

Para calcular esta ganancia se realiza un análisis del circuito que se detalla a continuación. Como la impedancia de entrada del amplificador operacional es muy grande (idealmente infinita), se puede asumir que por la entrada inversora no entra corriente luego las resistencias R_1 y R_2 forman un divisor de tensión para V_o, y por tanto V_- es:

$$V_- = V_o \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Por otra parte la tensión de salida es: $V_0 = A_{LA} \cdot (V_+ - V_-)$.

Siendo A_{LA} la ganancia en lazo abierto. Sustituyendo V_+ por V_i y V_- por la expresión obtenida anteriormente se obtiene que:

$$V_o = A_{LA} \cdot (V_i - V_o \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}) => V_o \cdot (1 + A_{LA} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}) = A_{LA} \cdot V_i =>$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{A_{LA}}{1 + A_{LA} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

Como la ganancia en lazo abierto es muy grande:

$$1 + A_{LA} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \approx A_{LA} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Y la expresión para la ganancia en lazo cerrado queda como:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{A_{LA}}{A_{LA} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Este resultado muestra como la ganancia en lazo cerrado es independiente de la ganancia en lazo abierto, y solo depende de la red de alimentación. Ajustando los valores de R_1 y R_2 se puede obtener un amplificador de la ganancia que se desee.

Otra forma de analizar el circuito es suponer que al ser la impedancia de entrada del operacional infinita no existirá caída de voltaje entre la entrada inversora y la no inversora, es decir que: $V_- = V_+ = V_i$.

Haciendo esta suposición se obtiene que la corriente que circula por R_1 y R_2 es: $I = \frac{V_i}{R_1}$.

Y por tanto la tensión de salida es: $V_o = V_i \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1}$.

Por lo que la ganancia en lazo cerrado es igual a la obtenida anteriormente. En la Figura 8.12 se muestra el mismo circuito analizado de esta forma.

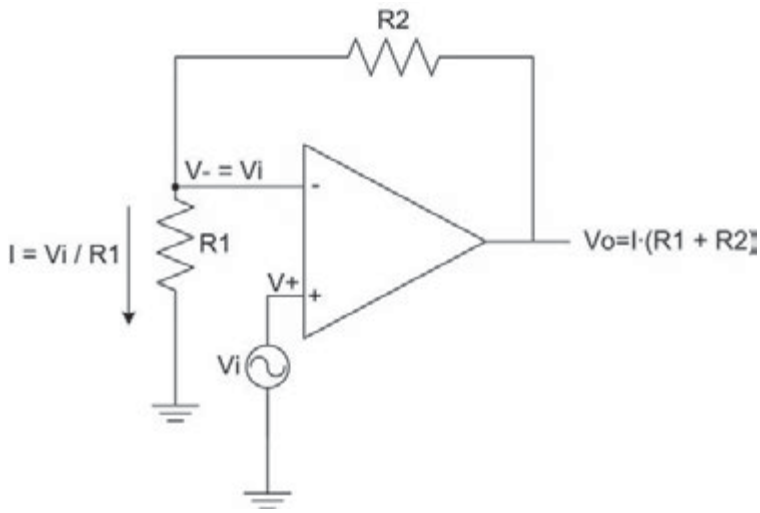


Figura 8.12. *Análisis suponiendo V+=V*

Para el resto de circuitos con operacional que se presentan en este tema, se supondrá que $V_+ = V_-$ para simplificar el análisis de los circuitos.

8.3.3 CONFIGURACIÓN INVERSORA

Un amplificador operacional está en configuración inversora cuando hay realimentación negativa y la entrada de señal se hace por la entrada inversora del operacional. Un ejemplo de esta configuración se muestra en la Figura 8.13.

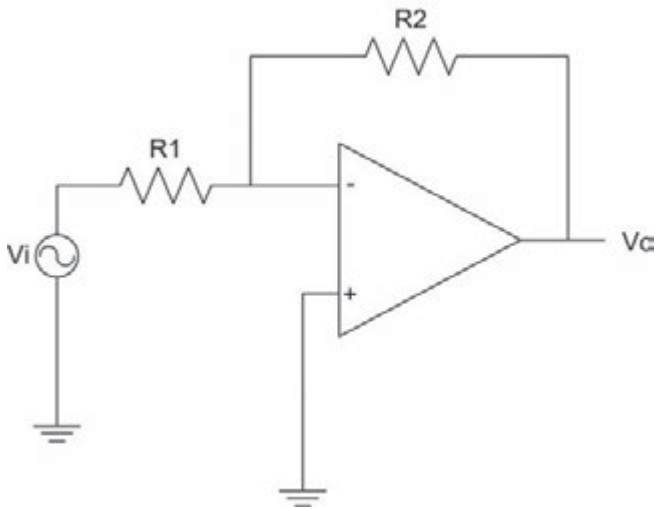


Figura 8.13. *Amplificador operacional en configuración inversora*

El análisis de este circuito se realiza de la siguiente forma: como la entrada no inversora se encuentra conectada a tierra, suponiendo que $V_- = V_+ = 0$ se tiene que la intensidad que circula por R_1 es:

$$I_{R1} = \frac{V_i}{R_1}$$

Como la impedancia de entrada del operacional es muy grande se supone que no entra corriente por la entrada inversora, por lo que toda la corriente que circula por R_1 circula también por R_2, y por tanto la tensión de la salida es:

$$V_o = -V_i \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Por tanto la ganancia en lazo cerrado del amplificador inversor es:

$$A_{LC} = -\frac{R_2}{R_1}$$

El signo menos de la ganancia es lo que le da la característica de inversor, haciendo que la salida esté desfasada 180º respecto de la entrada. En la Figura 8.14 se muestran los detalles de este análisis.

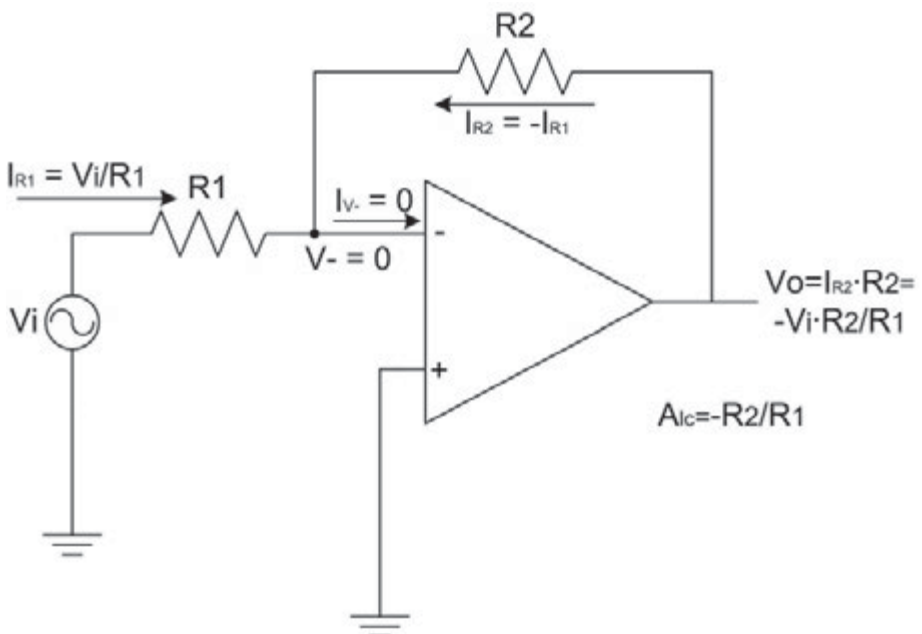


Figura 8.14. *Análisis de la configuración inversora*

PRÁCTICA 8.1

AMPLIFICADOR INVERSOR

En esta actividad se realizará el montaje de un circuito amplificador inversor. Para ello se necesita el siguiente material:

- ✓ 2 fuentes de alimentación de 12 V, o una fuente con doble salida +12 y -12, para alimentar el operacional.
- ✓ Un generador de señales.
- ✓ Un amplificador operacional LM741.
- ✓ Una resistencia de 1 KΩ y otra de 2 KΩ.
- ✓ Un osciloscopio.

En la figura NUEVA se muestra el montaje a realizar. Preste atención a la numeración de las distintas patillas del operacional. Para este montaje calcule cuál es la ganancia del amplificador.

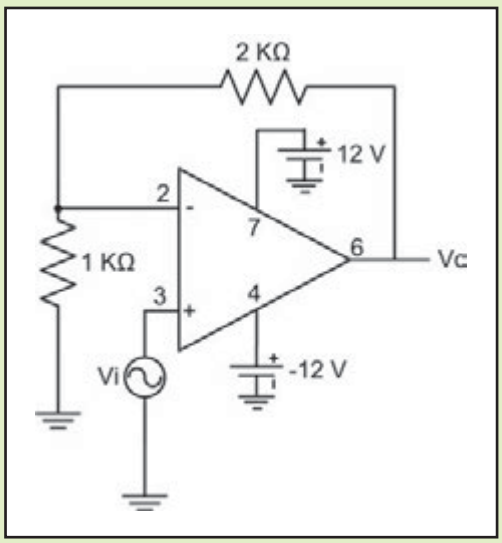


Figura 8.15. *Montaje amplificador inversor*

Una vez montado el circuito, encienda el generador de señales y configúrelo para que proporciona una señal senoidal de 1 V de amplitud y 1 KHz de frecuencia.

Mida con el osciloscopio el voltaje de entrada y el voltaje de salida del amplificador y compruebe si coincide con el valor esperado (Voltaje de salida = Voltaje de entrada * ganancia del amplificador).

Observe también como la señal de salida está desfasada 180º con respecto a la señal de entrada, al estar el amplificador en configuración inversora.

Una aplicación de la configuración inversora es el sumador de señales. Es un circuito que permite sumar dos o más señales ponderadas por constantes. Es decir, a partir de dos señales V_1 y V_2 se puede obtener una señal de la forma:

$$V_o = -(a \cdot V_1 + b \cdot V_2)$$

Los valores de a y b se pueden ajustar modificando el valor de algunas de las resistencias del circuito. En la Figura 8.16 se muestra un sumador con dos entradas.

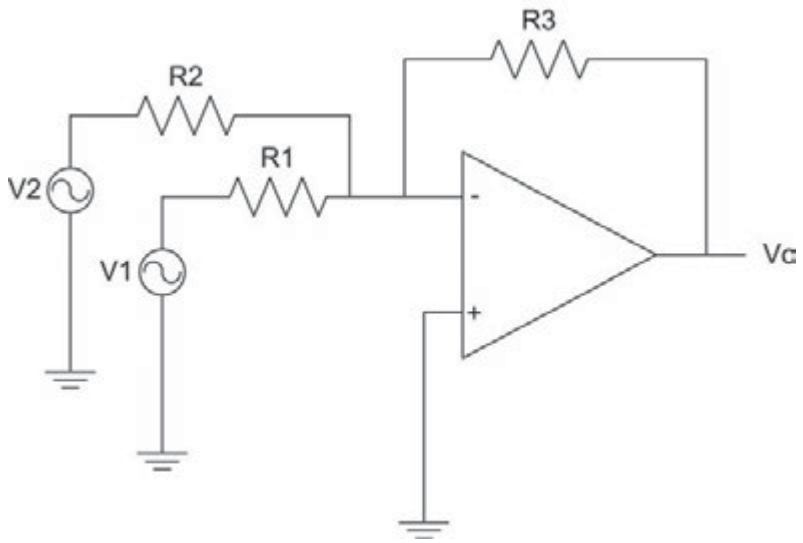


Figura 8.16. *Circuito sumador con operacional*

El circuito se puede analizar utilizando el principio de superposición, obteniendo primero la salida en función de V_1, y luego obteniendo la salida en función de V_2, para finalmente sumar ambos resultados. La salida si solo estuviera V_1 sería:

$$V_o = -V_1 \cdot \frac{R_3}{R_1}$$

Si solo estuviera V_2 la salida sería: $V_o = -V_2 \cdot \dfrac{R_3}{R_2}$

Por lo tanto, la salida total es: $V_o = -(V_1 \cdot \dfrac{R_3}{R_1} + V_2 \cdot \dfrac{R_3}{R_2})$

Otra posible aplicación, en este caso utilizando simultáneamente la entrada inversora y la no inversora, es un circuito restador como el mostrado en la Figura 8.17.

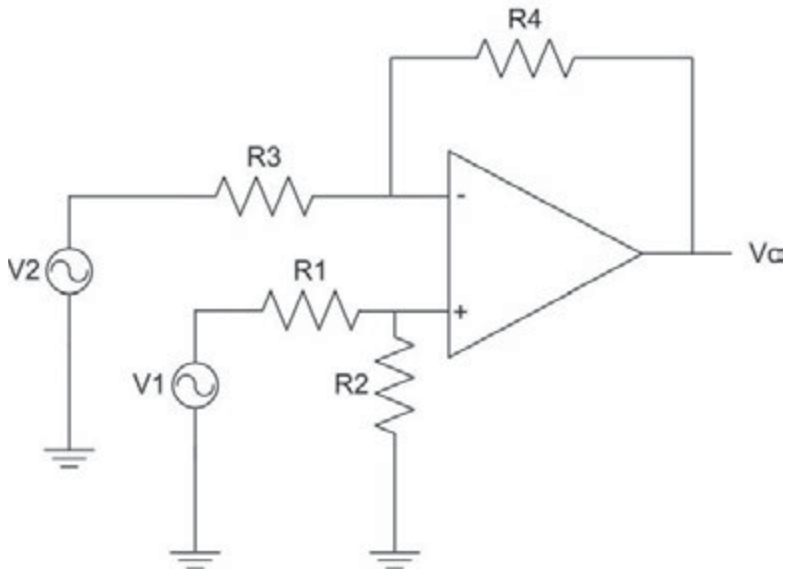


Figura 8.17. *Circuito restador con operacional*

En este caso el análisis del circuito se hace también utilizando el principio de superposición. Si solo se tiene en cuenta V_1, se sustituye V_2 por un cortocircuito quedando un circuito equivalente al mostrado en la Figura 8.18.

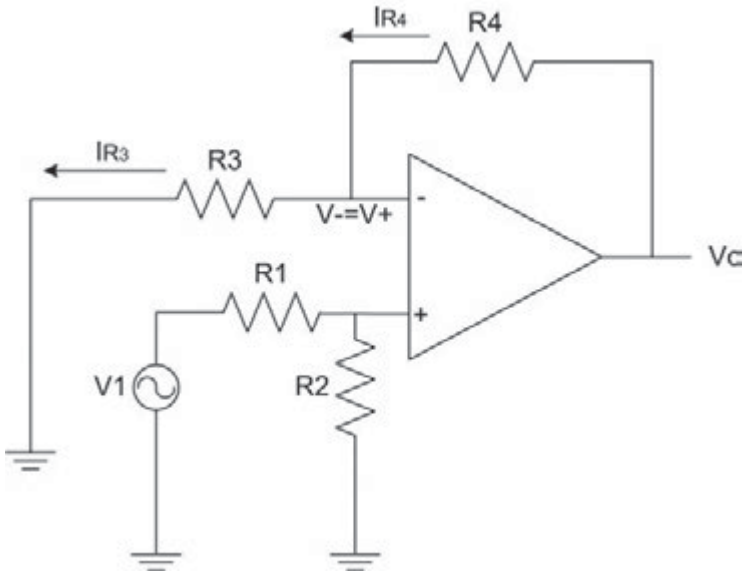


Figura 8.18. *Análisis del restador utilizando superposición. Entrada V1*

En ese circuito, suponiendo que no entra corriente por la entrada no inversora, la tensión en la entrada no inversora es:

$$V_+ = V_1 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = V_-$$

La intensidad que circula por la resistencia R_3 será: $I_{R3} = \dfrac{V_-}{R_3}$

Que es la misma intensidad que circula por R_4, suponiendo que al ser la impedancia de entrada del operacional infinita no entra corriente por la entrada inversora. Por tanto la salida V_o es: $V_0 = I_{R3} \cdot R_4 + V_-$.

Que sustituyendo los valores de I_{R3} y V_- queda como: $V_o = V_1 \cdot \dfrac{R_2 \cdot (R_3 + R_4)}{R_3 \cdot (R_1 + R_2)}$

Si solo se tiene en cuenta V_2, se sustituye V_1 por un cortocircuito quedando un circuito equivalente como el mostrado en la Figura 8.19.

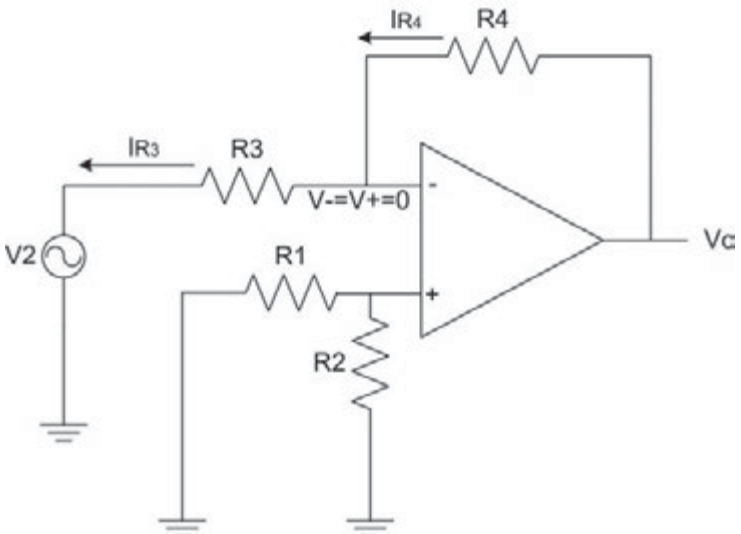


Figura 8.19. *Análisis del restador utilizando superposición. Entrada V2*

En ese circuito, suponiendo que no entra corriente por la entrada no inversora y por tanto no hay caída de tensión ni en R_1 ni en R_2 se tiene que la corriente que circula por R_3 es:

$$I_{R3} = -\frac{V_2}{R_3}$$

Que es la misma corriente que circula por R_4 si se supone que al ser la impedancia de entrada del operacional infinita no entra corriente por la entrada inversora. Por tanto la salida es:

$$V_o = -V_2 \cdot \frac{R_4}{R_3}$$

.

Juntando las dos soluciones parciales se obtiene que: $V_o = V_1 \cdot \frac{R_2 \cdot (R_3 + R_4)}{R_3 \cdot (R_1 + R_2)} - -V_2 \cdot \frac{R_4}{R_3}$

Si todas las resistencias son del mismo valor se tiene un restador puro donde: $V_0 = V_1 - V_2$.

Con otros valores de resistencias se obtiene un restador parametrizable de la forma: $V_0 = a \cdot V_1 - b \cdot V_2$.

ACTIVIDADES 8.3

- ¿Cuáles son las diferencias entre la configuración inversora y no inversora? ¿En qué casos se puede utilizar una u otra?

8.3.4 OTRAS APLICACIONES

Otra de las aplicaciones que se pueden realizar utilizando operacionales son circuitos integradores o derivadores. Ambos basan su funcionamiento en el uso de un condensador además del amplificador operacional. En la Figura 8.20 se muestra el **circuito integrador**.

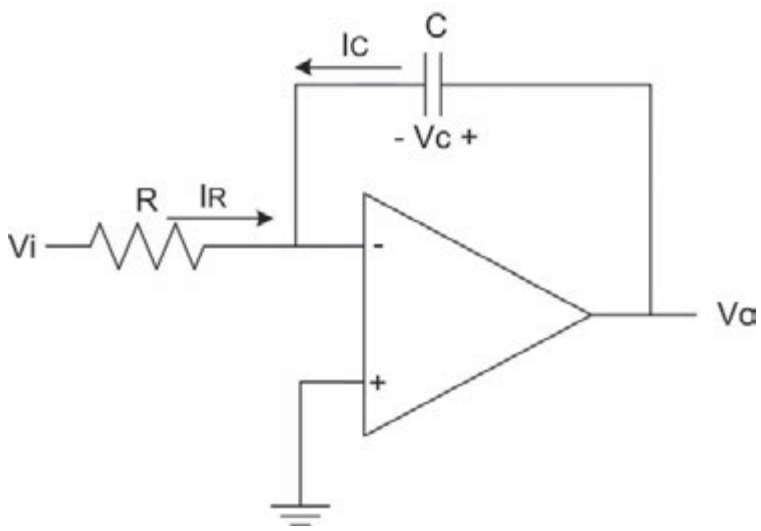


Figura 8.20. *Circuito integrador con operacional*

La intensidad que circula por la resistencia R es: $I_R = \frac{V_i}{R}$.

Que es la opuesta a la que circula por el condensador. Como la intensidad que circula por un condensador es igual a la derivada del voltaje en el condensador multiplicada por la capacidad del condensador, se obtiene que:

$$I_C = C \cdot \frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_i}{R} => dV_C = -\frac{V_i}{R \cdot C} dt => V_C = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_0^t V_i \cdot dt$$

Como la tensión de salida es igual a la tensión en el condensador, se obtiene que para este circuito la tensión de salida es la integral de la tensión de entrada multiplicada por una constante.

En la Figura 8.21 se muestra un **circuito derivador**.

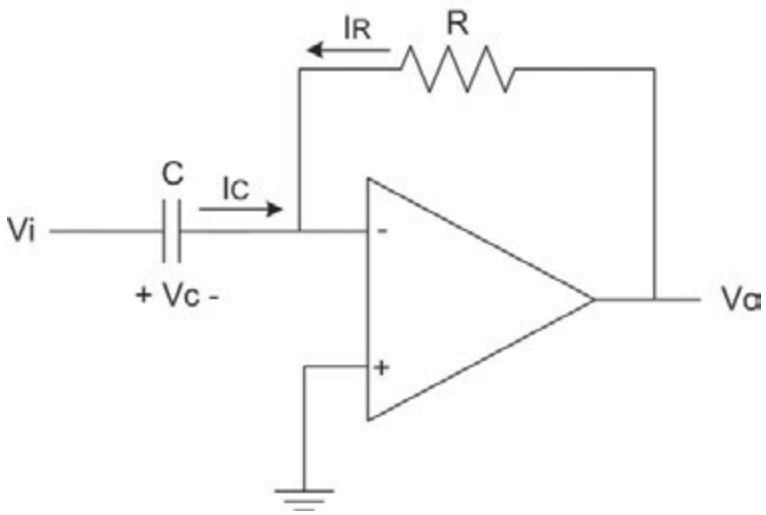


Figura 8.21. *Circuito derivador con operacional*

La corriente que circula por el condensador es: $I_C = C \cdot \frac{dVi}{dt}$

Que es a su vez el inverso de la corriente que circula por R, por lo que la tensión de salida es:

$$V_o = -R \cdot C \cdot \frac{dVi}{dt}$$

Es decir, que la salida es la derivada de la entrada multiplicada por una constante.

Otra aplicación común con amplificadores operacionales es su uso como comparadores. En esta aplicación no se usa una configuración realimentada, si no que se utiliza el operacional en lazo abierto. En la Figura 8.22 se muestra

un ejemplo de circuito comparador. Si $V_2 > V_1$ la entrada diferencial será positiva y la tensión de salida será igual a la ganancia por esa entrada diferencial, pero al ser la ganancia muy grande la salida saturará al nivel máximo que pueda dar el operacional (aproximadamente igual a la alimentación positiva $+V$). En el caso en que $V_2 < V_1$ la entrada diferencial será negativa y la salida saturará al valor mínimo que pueda dar el operacional (aproximadamente igual a la alimentación negativa $-V$).

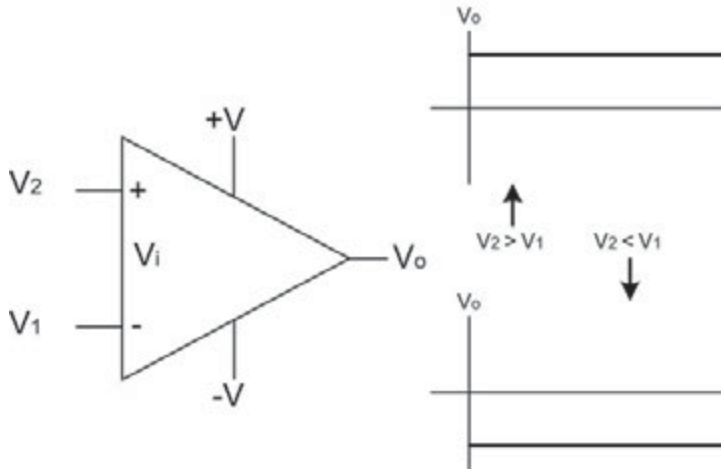


Figura 8.22. *Circuito comparador con operacional*

ACTIVIDADES 8.4

- ¿Para que sirve un circuito integrador? ¿Y uno derivador?
- ¿Para qué otro tipo de circuitos se utilizan amplificadores? Búscalo en Internet.

8.4 FILTROS ACTIVOS

Los **filtros activos** se diferencian de los filtros comunes estudiados en capítulos anteriores en que además de resistencias, bobinas y condensadores, los filtros activos también incluyen componentes activos como transistores o amplificadores operacionales.

El modo de funcionamiento aunque similar, también tiene diferencias: en un filtro pasivo la salida siempre va a ser menor que la entrada, en uno activo la salida puede ser mayor que la entrada ya que el elemento activo introduce una amplificación.

¿SABÍAS QUE...?

Los filtros están caracterizados por sus funciones de transferencia, así cualquier configuración de elementos activos o pasivos que consigan cierta función de transferencia serán considerados un filtro de cierto tipo.

En los siguientes apartados se presentan los circuitos básicos para filtros paso bajo, paso alto y paso banda con amplificador operacional.

8.4.1 PASO BAJO

Un **filtro paso bajo** es un filtro que amplifica las bajas frecuencias hasta una determinada frecuencia de corte, y atenúa el resto de frecuencias por encima de esa frecuencia de corte. Se considera como frecuencia de corte aquella frecuencia para la cual la amplitud de la salida es $1/\sqrt{2}$ veces la amplitud máxima de la salida.

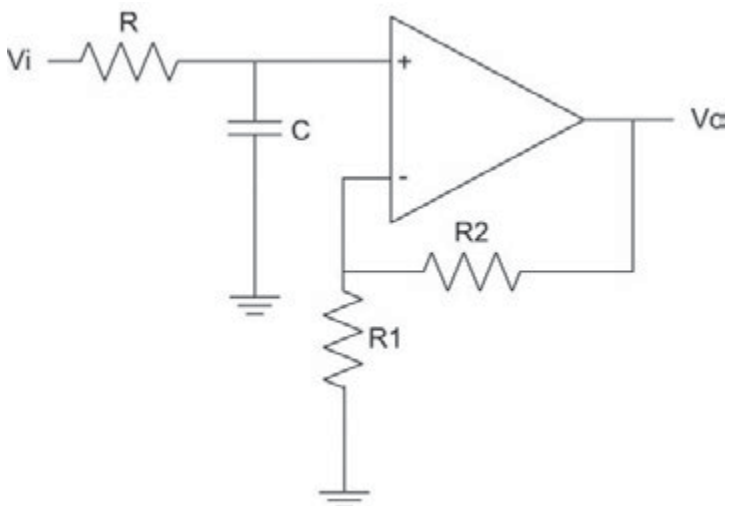


Figura 8.23. *Filtro paso bajo*

La Figura 8.23 muestra el circuito básico para un filtro paso bajo. En este circuito, la tensión en la entrada no inversora es:

$$V_+ = V_i \cdot \frac{-\dfrac{j}{\omega C}}{R - \dfrac{j}{\omega C}}$$

Agrupando términos y simplificando se obtiene que:

$$V_+ = V_i \cdot \frac{1 - jRC\omega}{1 + R^2C^2\omega^2}$$

Para simplificar un poco más los cálculos se va a trabajar solo con el módulo de esta tensión, que es:

$$|V_+| = |V_i| \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + R^2C^2\omega^2}}$$

El voltaje de salida V_o es: $V_o = V_- \cdot \frac{R_1 + R_F}{R_1}$

Y suponiendo que $V_- = V_+$: $|V_o| = |V_i| \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + R^2C^2\omega^2}}$

El término $\frac{R_1 + R_2}{R_1}$ es la ganancia del filtro cuando la frecuencia es 0 (corriente continua). El término $\frac{1}{\sqrt{1 + R^2C^2\omega^2}}$ es el término que depende de la frecuencia ω y el que determina la frecuencia de corte del filtro. La frecuencia para la que este término es igual a $\frac{1}{\sqrt{2}}$ es la frecuencia de corte:

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad \text{o} \quad f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Si se representa la ganancia del filtro en función de la frecuencia, se obtiene una gráfica como la mostrada en la Figura 8.24.

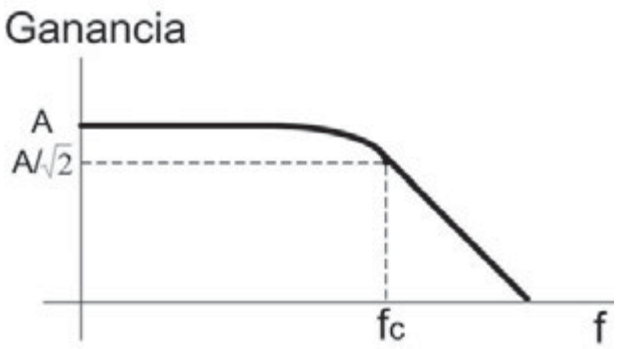


Figura 8.24. *Curva de ganancia del filtro paso bajo*

PRÁCTICA 8.2

FILTRO PASO BAJO

En esta actividad se realizará el montaje de un filtro paso bajo. Para ello se necesita el siguiente material:

- ✓ 2 fuentes de alimentación de 12 V, o una fuente con doble salida +12 y -12, para alimentar el operacional.
- ✓ Un generador de señales.
- ✓ Un amplificador operacional LM741.
- ✓ Un condensador cerámico de 10 nF.
- ✓ Varias resistencias.
- ✓ Un osciloscopio.

En la Figura 8.25 se muestra el montaje a realizar. Preste atención a la numeración de las distintas patillas del operacional. Antes de realizar el montaje calcule el valor de R para que la frecuencia de corte del filtro sea de 1 KHz. Escoja los valores de R1 y R2 de forma que la ganancia del filtro sea 2.

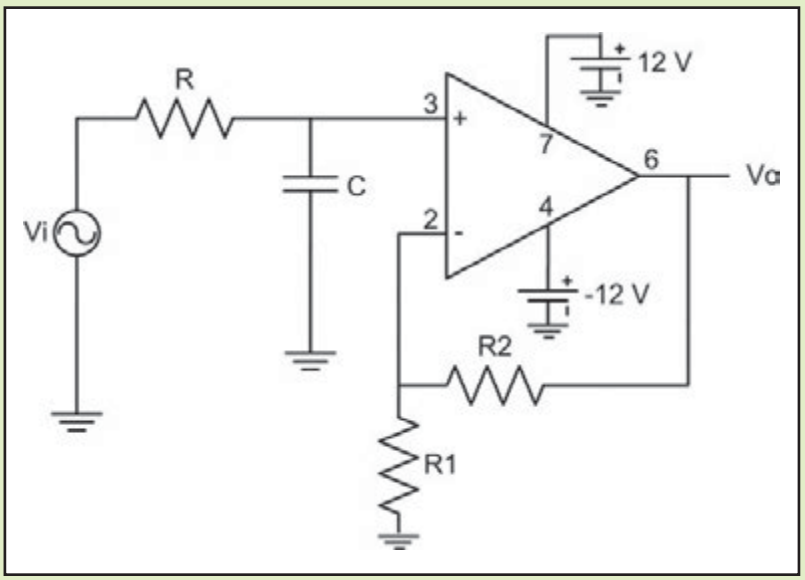


Figura 8.25. *Montaje filtro paso bajo*

Una vez calculados los valores de las resistencias, y montado el circuito, configure el generador de señales para que proporcione una señal sinusoidal de 1 V de amplitud y 1 Hz de frecuencia.

Vaya aumentando la frecuencia de la señal de entrada y mida la ganancia del filtro para cada caso. Cuando la ganancia del filtro sea igual a aproximadamente el 70% de la ganancia que tenía a bajas frecuencias habrá encontrado la frecuencia de corte del filtro. Compruebe si la frecuencia de corte coincide con la esperada.

8.4.2 PASO ALTO

Un **filtro paso alto** es un filtro que amplifica las altas frecuencias hasta una determinada frecuencia de corte, y atenúa al resto de frecuencias por debajo de esa frecuencia de corte. Se considera como frecuencia de corte aquella frecuencia para la cual la amplitud de la salida es $1/\sqrt{2}$ veces la amplitud máxima de la salida.

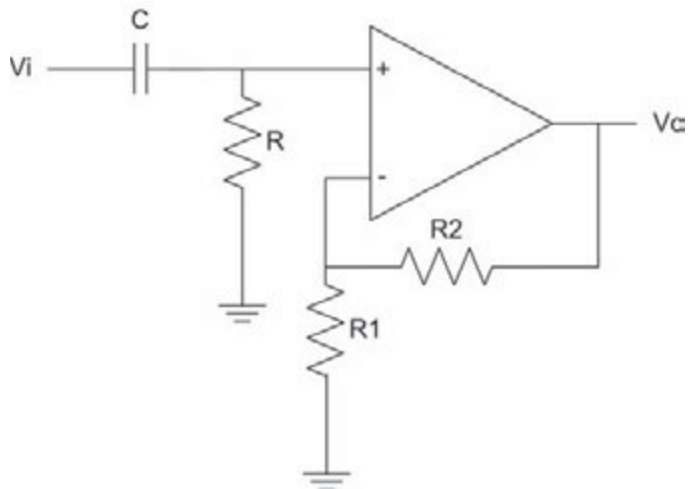


Figura 8.26. *Filtro paso alto*

La Figura 8.26 muestra el circuito básico para un filtro paso alto. En este circuito, la tensión en la entrada no inversora es:

$$V_+ = V_i \cdot \frac{R}{R - \frac{j}{\omega C}}$$

Agrupando términos y simplificando se obtiene que: $V_+ = V_i \cdot \dfrac{RC\omega}{RC\omega - j}$

Para simplificar más los cálculos se va a trabajar solo con el módulo de la tensión, que es:

$$|V_+| = |V_i| \cdot \frac{RC\omega}{\sqrt{1 + R^2C^2\omega^2}}$$

El voltaje de salida V_o es: $V_o = V_- \cdot \dfrac{R_1 + R_2}{R_1}$

Y suponiendo que $V_-=V_+$: $|V_o| = |V_i| \cdot \dfrac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \dfrac{RC\omega}{\sqrt{1 + R^2C^2\omega^2}}$

El término $\frac{R_1 + R_2}{R_1}$ es la ganancia máxima del filtro. El término $\frac{RC\omega}{\sqrt{1+R^2C^2\omega^2}}$ es el término que depende de la frecuencia ω y el que determina la frecuencia de corte del filtro. Si se analizan los límites cuando ω → 0 y cuando ω → ∞ se obtiene que:

$$\lim_{\omega\to 0}\frac{RC\omega}{\sqrt{1+R^2C^2\omega^2}} = 0 \text{ y } \lim_{\omega\to\infty}\frac{RC\omega}{\sqrt{1+R^2C^2\omega^2}} = 1$$

Esto quiere decir que para frecuencias próximas a 0 la ganancia es 0, y para frecuencias muy altas la ganancia es máxima. La frecuencia para la que este término es igual a $\frac{1}{\sqrt{2}}$ es la frecuencia de corte: $\omega_c = \frac{1}{RC}$ o $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$.

Si se representa la ganancia del filtro en función de la frecuencia, se obtiene una gráfica como la mostrada en la Figura 8.27.

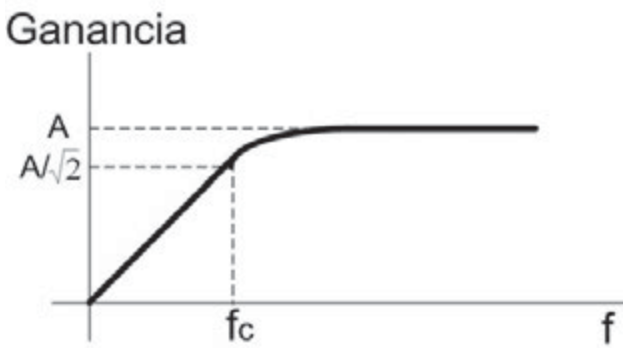


Figura 8.27. *Curva de ganancia del filtro paso alto*

¿SABÍAS QUE...?

Una aplicación de un filtro de paso alto sería hacer que las altas frecuencias de una señal de audio fuesen a un altavoz para sonidos agudos mientras que un filtro paso bajo haría lo mismo pero con los graves.

ACTIVIDADES 8.5

- ¿Qué aplicaciones en la vida real tiene un filtro de paso alto o de paso bajo?

8.4.3 PASO BANDA

Un **filtro paso banda** es un filtro que amplifica las señales de frecuencias comprendidas entre una frecuencia de corte inferior y una frecuencia de corte superior, y atenúa el resto de frecuencias. La ganancia del filtro en función de la frecuencia tiene una forma como la mostrada en la Figura 8.28.

Figura 8.28. *Curva de ganancia del filtro paso banda*

Una forma sencilla de construir un filtro paso banda es encadenar un filtro paso bajo y un filtro paso alto. La frecuencia de corte del filtro paso alto debe coincidir con la fc_1 del filtro paso banda, y la frecuencia de corte del filtro paso bajo debe coincidir con la fc_2 del filtro paso banda. En la Figura 8.29 se muestra un ejemplo de filtro paso banda, sin amplificación para simplificar el análisis.

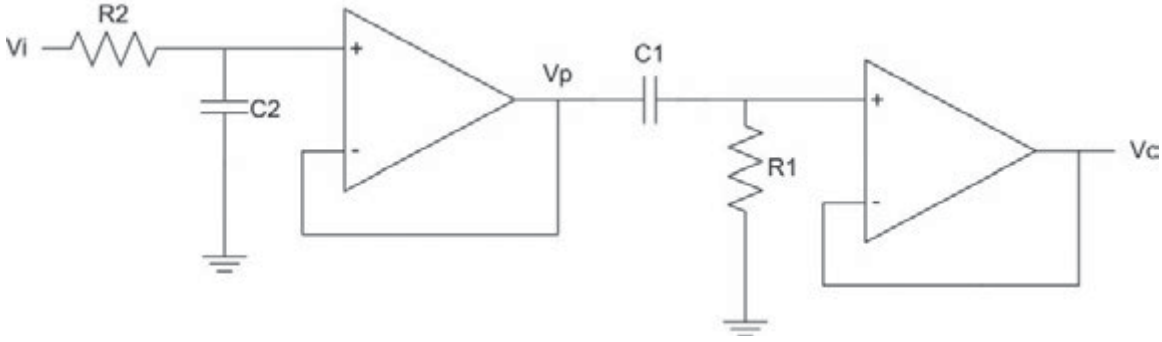


Figura 8.29. *Filtro paso banda*

La primera etapa es un filtro paso bajo, por lo que la salida del primer operacional es:

$$|V_p| = |V_i| \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + R_2^{\,2} C_2^{\,2} \omega^2}}$$

La salida del primer operacional es a su vez entrada de la segunda etapa de filtrado, por lo que la salida de la segunda etapa será:

$$|V_o| = |V_p| \cdot \frac{R_1 C_1 \omega}{\sqrt{1 + R_1^2 C_1^2 \omega^2}}$$

Sustituyendo se obtiene la salida total en función de la entrada:

$$|V_o| = |V_i| \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + R_2^2 C_2^2 \omega^2}} \cdot \frac{R_1 C_1 \omega}{\sqrt{1 + R_1^2 C_1^2 \omega^2}}$$

Este filtro tiene dos frecuencias de corte, la frecuencia de corte inferior:

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

Y la frecuencia de corte superior: $f_{c2} = \dfrac{1}{2\pi R_2 C_2}$

Con este tipo de filtros no se pueden conseguir anchos de banda muy estrechos, al ser la atenuación del filtro paso bajo y del filtro paso alto utilizados poco pronunciada. En caso de necesitar anchos de banda estrechos se debe recurrir a filtros con otras estructuras como la estructura *Sallen-Key* o la *celda de Rauch*, que se muestran en las Figuras 8.30 y 8.31, pero que no se analizarán en detalle debido a su complejidad de análisis.

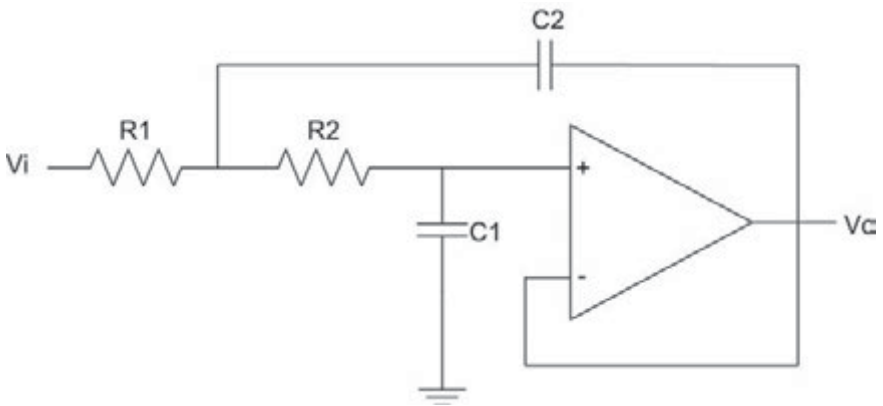


Figura 8.30. *Filtro paso banda con estructura Sallen-Key*

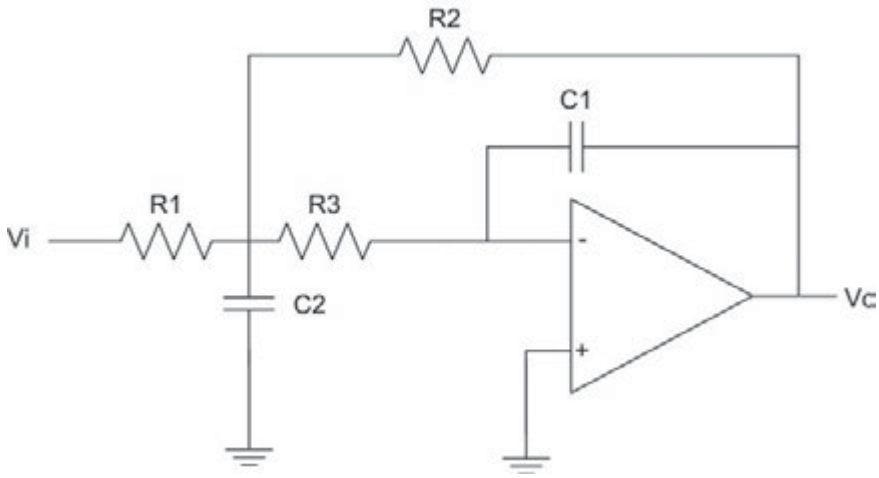


Figura 8.31. *Filtro paso banda con celda de Rauch*

¿SABÍAS QUE...?

En inglés se dice:

- Amplificador: *amplifier*.
- Amplificador de potencia: *power amplifier*.
- Filtro de paso bajo: *low-pass filter*.
- Filtro de paso alto: *high-pass filter*.

ACTIVIDADES 8.6

- ¿Cuáles son las diferencias entre un filtro de paso bajo, de paso alto y de paso banda?
- ¿Qué representan las funciones de transferencias de cada uno de ellos?
- Calcula las frecuencia de corte de un filtro de paso bajo sabiendo que R = 50 Ω y C = 300 nF.

8.5 CONVERTIDORES I-V Y V-I

Los **circuitos convertidores corriente-tensión** (*I-V*) tienen como objetivo obtener una tensión $V(t)$ proporcional a una corriente $i(t)$. El circuito más básico que se podría pensar para convertir una corriente en una tensión es una simple resistencia, tal como se muestra en la Figura 8.32. En ese circuito, la tensión en la resistencia es proporcional a la corriente que entra en el circuito. El inconveniente de este circuito es que la impedancia de entrada del circuito depende de la resistencia (en realidad la impedancia de entrada es igual a la resistencia).

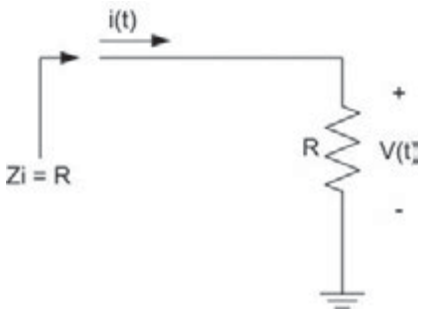


Figura 8.32. *Convertidor I-V básico*

Lo ideal sería que la impedancia de entrada del circuito convertidor *I-V* sea lo más baja posible, idealmente 0. Un circuito con estas características se puede obtener de forma sencilla utilizando un amplificador operacional. En la Figura 8.33 se muestra un **convertidor** *I-V* basado en operacional.

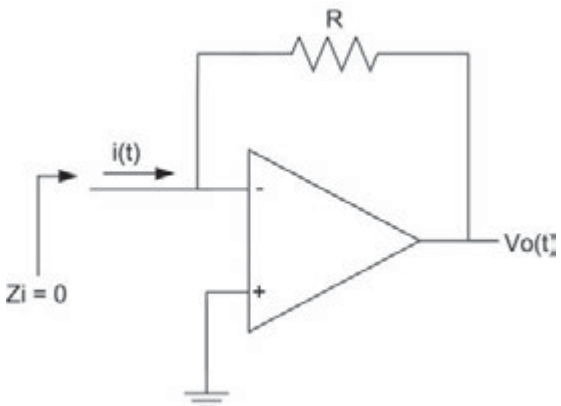


Figura 8.33. *Convertidor I-V con operacional*

Como el operacional está en configuración de realimentación negativa, se supone que $V_+ = V_- = 0$, y por tanto la impedancia de entrada del convertidor es nula. Además toda la corriente de entrada circula por la resistencia, por lo que la tensión de salida del operacional es proporcional a la intensidad de entrada: $V_0(t) = -i(t) \cdot R$.

El segundo tipo de convertidores que se van a presentar son los **convertidores tensión-corriente** (*V-I*). Estos convertidores tienen como objetivo obtener una corriente $i(t)$ proporcional a una tensión de entrada $V(t)$. En la Figura 8.34 se muestra un convertidor *V-I* con carga flotante.

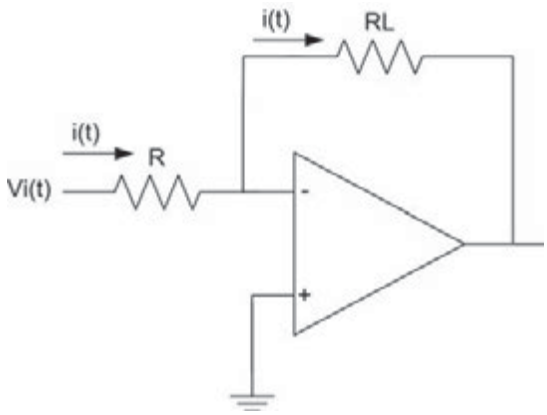


Figura 8.34. *Convertidor V-I con carga flotante*

Como hay realimentación negativa, se supone que $V_+ = V_- = 0$, por lo que la intensidad que circula por la resistencia R, que es la misma que circula por la carga R_L es: $i(t) = \dfrac{Vi(t)}{R}$.

Otro circuito más complejo, con carga a tierra en lugar de carga flotante, se muestra en la Figura 8.35.

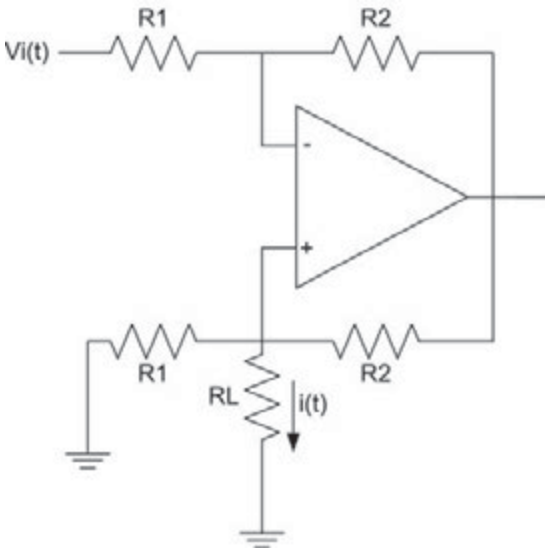


Figura 8.35. *Convertidor V-I con carga a tierra*

El análisis de este circuito es complejo y no se abordará en este libro, baste con señalar que la intensidad que circula por la resistencia de carga es: $i(t) = \dfrac{Vi(t)}{R_1}$.

RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se han presentado las principales características de uno de los circuitos integrados más usados en electrónica: el amplificador operacional.

El amplificador diferencial es un tipo de amplificador que es la base del amplificador operacional: un operacional está formado por dos o más etapas diferenciales más una etapa final de salida.

Lo amplificadores operacionales reciben su nombre por que originalmente se utilizaban para realizar operaciones, como los estudiados que permiten realizar sumas, restas, comparación, integración y derivación de señales.

Otra aplicación de los amplificadores operacionales es en filtros activos, que son filtros que además de atenuar ciertas frecuencias permiten amplificar otras frecuencias.

También se han estudiado los circuitos convertidores *V-I* e *I-V* que permiten obtener una corriente proporcional a un voltaje, o un voltaje proporcional a una corriente.

EJERCICIOS PROPUESTOS

1. Para el circuito de la Figura 8.36 calcule el valor de la salida V_o en función de la entrada V_i.

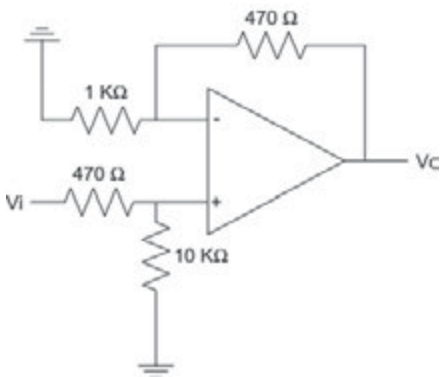


Figura 8.36. *Circuito del ejercicio 1*

2. El circuito de la Figura 8.37, ¿es un filtro paso bajo o paso alto? Calcule su función de transferencia. ¿Cuál es la frecuencia de corte?

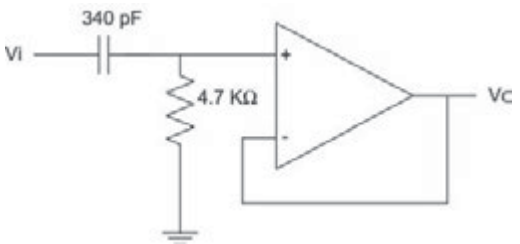


Figura 8.37. *Circuito del ejercicio 2*

3. Calcule la ganancia V_o/V_i pare el circuito de la Figura 8.38.

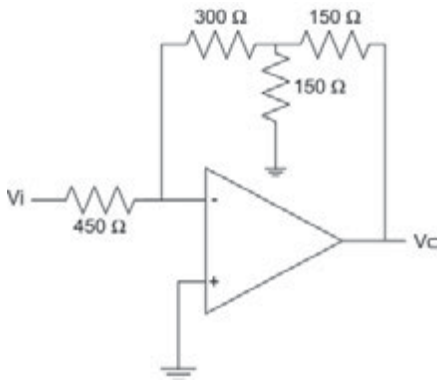


Figura 8.38. *Circuito del ejercicio 3*

4. Diseñe un circuito sumador con amplificador operacional que realice la operación V_o = 2*Va + 4*Vb.

5. Diseñe un circuito restador con amplificador operacional que realice la operación V_o = 4*Va – 5*Vb.

TEST DE CONOCIMIENTOS

1 La impedancia de entrada de un amplificador operacional ideal es:
- **a)** Muy grande.
- **b)** Muy pequeña.
- **c)** Infinita.
- **d)** Nula.

2 La impedancia de salida de un amplificador operacional ideal es:
- **a)** Infinita.
- **b)** Nula.
- **c)** Muy pequeña.
- **d)** Muy grande.

3 La ganancia de un amplificador operacional ideal es:
- **a)** Muy pequeña.
- **b)** Nula.
- **c)** Muy grande.
- **d)** Infinita.

4 La realimentación negativa:
- **a)** Permite que la salida supere el valor de la alimentación.
- **b)** Nunca se debe usar, ya que puede dañar el circuito integrado.
- **c)** Permite ajustar la ganancia para que la salida no supere el valor de la alimentación.
- **d)** Ninguna de las anteriores.

5 Un filtro activo:
- **a)** Es como uno pasivo, pero sin ganancia.
- **b)** Utiliza elementos activos como transistores o amplificadores operacionales.
- **c)** Solo puede ser paso alto.
- **d)** Ninguna de las anteriores.

6 Un convertidor *V-I*:

a) Produce una corriente proporcional a una tensión dada.
b) Produce una tensión proporcional a una corriente dada.
c) Se puede construir utilizando un solo amplificador operacional.
d) *a* y *c*.
e) *b* y *c*.

7 Una suposición que se suele hacer al analizar circuitos con realimentación negativa es que no entra corriente por la entrada inversora ni por la no inversora. ¿Qué característica del amplificador operacional es la que nos lleva a hacer esta suposición?

a) Impedancia de salida muy pequeña.
b) Ganancia muy grande.
c) Impedancia de entrada muy grande.
d) Ancho de banda muy grande.

8 La razón de rechazo en modo común RRMC da una idea de:

a) La ganancia del amplificador.
b) La inmunidad al ruido del amplificador.
c) El ancho de banda del amplificador.
d) Ninguna de las anteriores.

9 Osciladores y temporizadores

OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

- ✓ Comprender el funcionamiento de los osciladores.
- ✓ Analizar el funcionamiento de distintos tipos de osciladores.
- ✓ Comprender el funcionamiento del temporizador integrado 555.

Un **oscilador** es un sistema capaz de generar por si mismo una señal oscilante como puede ser una onda cuadrada, o una señal sinusoidal. Los osciladores tienen utilidad en sistemas digitales donde siempre suele utilizarse una o varias señales de reloj para sincronizar las distintas partes del sistema. En sistemas analógicos también se utilizan osciladores en circuitos como por ejemplo los moduladores de señal y otros circuitos de radio frecuencia.

Un **temporizador** es un circuito que permite generar un pulso de voltaje alto (o bajo) de una duración determinada. Son circuitos que generalmente basan su funcionamiento en la carga y descarga de un condensador.

¿SABÍAS QUE...?

La mayoría de los equipos electrónicos utiliza para su funcionamiento señales eléctricas de uno de estos tres tipos: ondas sinusoidales, ondas cuadradas y ondas tipo diente de sierra.

En este capítulo se presentarán distintos tipos de osciladores tanto de onda cuadrada como el circuito integrado 555 y los osciladores de relajación, así como osciladores sinusoidales como los osciladores LC, cristal y los PLL. También se mostrará el uso del 555 como temporizador programable.

9.1 OSCILADORES

Un oscilador es un circuito que produce una forma de onda periódica en su salida por si mismo, utilizando solamente el voltaje de alimentación de corriente continua.

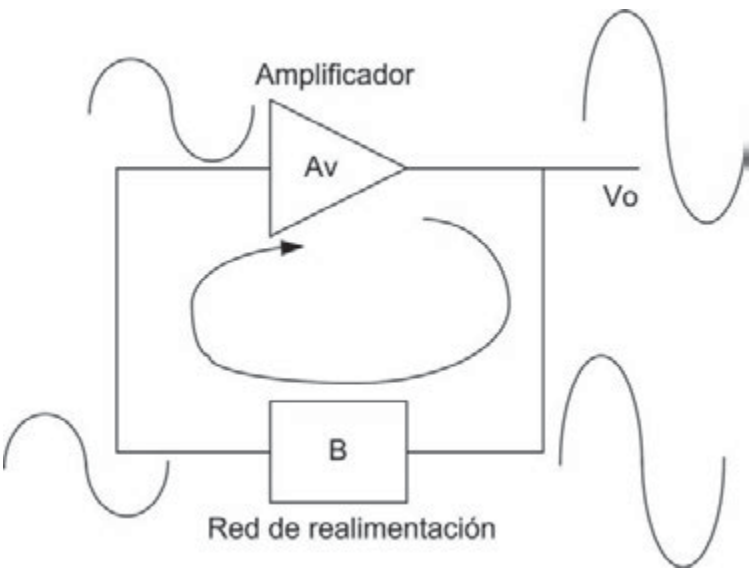


Figura 9.1. *Oscilación basada en realimentación positiva*

Salvo los osciladores de relajación que se presentarán más adelante, el funcionamiento de los osciladores se basa en el principio de realimentación positiva con amplificadores: una parte del voltaje de salida del amplificador vuelve a la entrada del mismo a través de un lazo de realimentación. Esta realimentación, bajo las condiciones apropiadas, hace que se produzca una señal que se sostiene a si misma produciendo una onda sinusoidal continua. La Figura 9.1 muestra gráficamente el concepto de oscilación basado en realimentación positiva.

Las condiciones para que se mantenga la oscilación en un circuito de este tipo son dos:

- Que el desfase producido por el lazo de realimentación sea nulo (0º).
- Que la ganancia de voltaje en lazo cerrado sea igual a 1.

La ganancia en lazo cerrado es igual a la ganancia del amplificador multiplicada por la atenuación del lazo de realimentación: $A_{lc} = A_v \cdot B$.

Por otra parte, para que arranque la oscilación es necesario que la ganancia en lazo cerrado sea mayor que 1, de forma que la pequeña oscilación que se produce al conectar la alimentación del circuito se vaya amplificando hasta alcanzar un nivel deseado. Así que por una parte se necesita que la ganancia en lazo cerrado sea mayor que 1 para que se produzca el arranque y por otra parte se necesita que sea igual a 1 para que una vez alcanzado el nivel deseado se mantenga la oscilación. En la Figura 9.2 se muestra gráficamente este concepto.

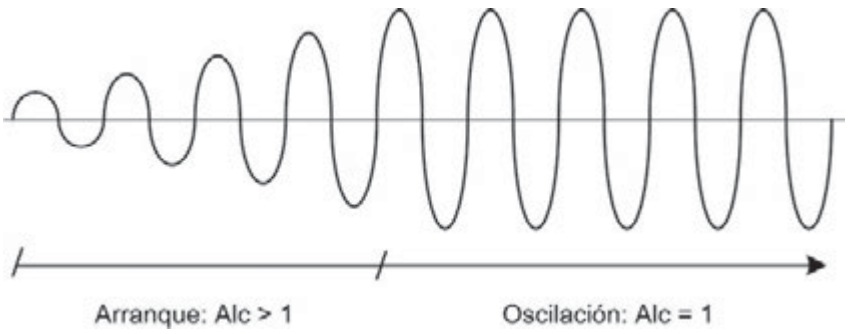


Figura 9.2. *Condiciones de arranque y de mantenimiento de la oscilación*

¿SABÍAS QUE...?

Los osciladores tienen numerosas aplicaciones: generadores de frecuencias de radio y de televisión, osciladores locales en los receptores, generadores de barrido en los tubos de rayos catódicos, etc.

9.1.1 OSCILADORES RC

Los osciladores RC se caracterizan por utilizar una red de realimentación positiva constituida por resistencias (R) y condensadores (C). Uno de los más utilizados es el **oscilador de puente de Wien**, que utiliza una red de realimentación con dos resistencias y dos condensadores como la mostrada en la Figura 9.3.

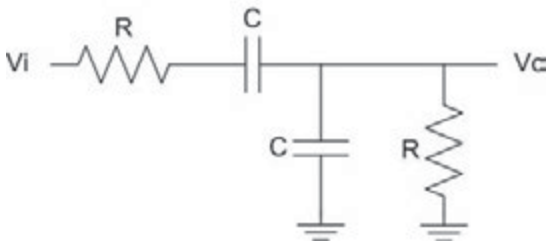


Figura 9.3. *Red de realimentación RC*

La función de transferencia de esta red tiene una frecuencia central que se denomina frecuencia de resonancia para la cual la ganancia de la red es de 1/3 y el desfase es de 0º. A ambos lados de la frecuencia de resonancia la ganancia disminuye progresivamente hasta hacerse nula y el desfase es distinto de 0º. Esta frecuencia de resonancia depende de los valores de R y C, siendo: $f_r = \dfrac{1}{2\pi RC}$

Esta red RC se conecta como red de realimentación positiva a un amplificador basado en operacional, tal como se muestra en la Figura 9.4.

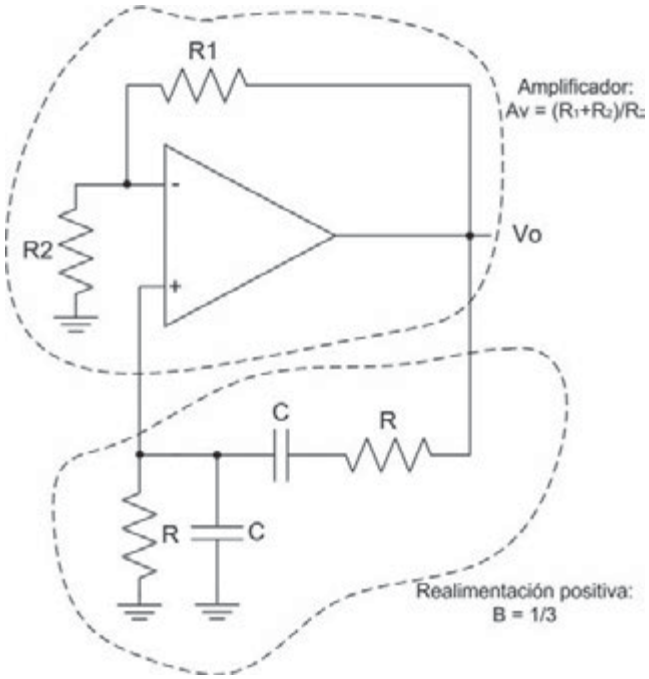


Figura 9.4. *Oscilador de puente de Wien*

La ganancia del amplificador (sin contar con la red RC) es: $Av = \dfrac{R_1 + R_2}{R_2}$

Para que se de la condición de oscilación la ganancia del amplificador debe ser igual a 3, para compensar la atenuación de 1/3 que introduce la red RC y tener una ganancia total igual a 1. Para ello:

$$3 = \frac{R_1 + R_2}{R_2} => R_1 = 2R_2$$

Una forma de conseguir el arranque manual de este oscilador es utilizar una resistencia variable en R_2, de tal forma que al arranque esta resistencia sea pequeña y por tanto la ganancia del amplificador se mayor que 3 y la ganancia total sea mayor que 1. Una vez la salida ha llegado a la amplitud deseada se aumenta el valor de R_2 hasta que la ganancia total sea 1 y la salida se estabilice.

EJEMPLO 9.1

Se tiene un oscilador en puente de Wien con una red de realimentación formada por un condensador de 200 nF y una resistencia de 15 kΩ. Calcular su frecuencia de oscilación.

Para ello, solo será necesario utilizar la ecuación $f_r = \frac{1}{2\pi RC}$ y sustituir sus valores.

¿Qué condiciones han de darse para que se produzca la oscilación? Si R_1 es 5 kΩ.

$R_2 = 2\ R_1$.

9.1.2 OSCILADORES LC Y CRISTAL

Los osciladores RC, como el de puente de *Wien*, no son apropiados para frecuencias mayores a 1 MHz, por lo que para frecuencias más elevadas se usan elementos de realimentación LC. Además, los amplificadores operacionales también limitan la frecuencia máxima del oscilador, por lo que para frecuencias elevadas se utilizan transistores como elemento de ganancia en lugar de operacionales.

¿SABÍAS QUE...?

El principio de Barkhausen dice que las condiciones necesarias y suficientes para que cualquier amplificador realimentado oscile son que la señal realimentada esté en fase u que la ganancia del lazo cerrado sea mayor o igual a 1.

Un tipo de oscilador LC básico es el **oscilador Colpitts**, que recibe este nombre en honor a su inventor. En la Figura 9.5 se muestra este tipo de oscilador. Como se puede ver en la figura, utiliza un transistor BJT como elemento de ganancia y un circuito LC en el lazo de realimentación.

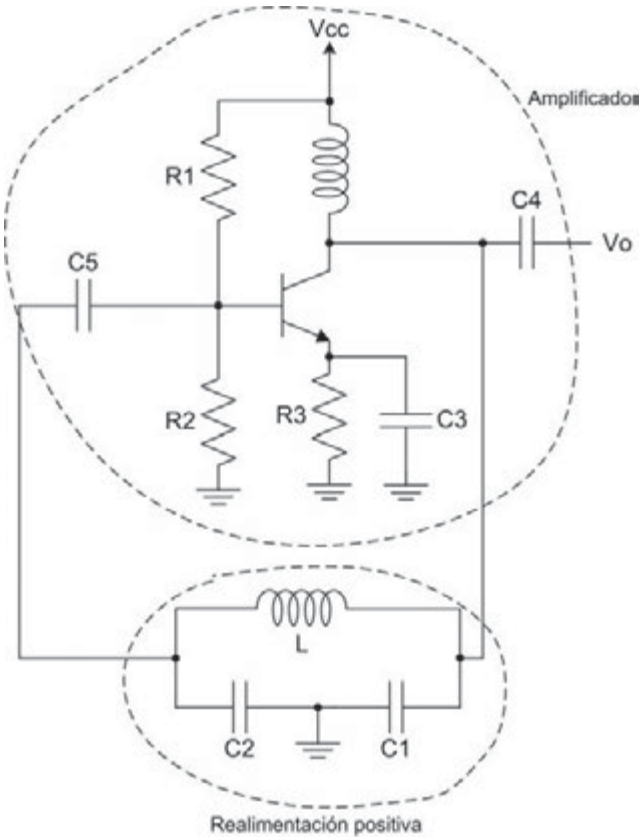


Figura 9.5. *Oscilador Colpitts*

La frecuencia de oscilación es aproximadamente igual a la frecuencia de resonancia del circuito LC:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_t}}$$

Siendo Ct: $C_t = \dfrac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$

Para asegurar la oscilación se tiene que cumplir que la ganancia en lazo cerrado sea igual a 1. La atenuación que introduce la red de realimentación LC depende únicamente del valor de los condensadores, siendo: $B = \dfrac{C_1}{C_2}$

Por tanto, para que la ganancia en lazo cerrado sea igual a 1, la ganancia del amplificador debe ser igual al inverso de la atenuación de la red de realimentación: $A_v = \dfrac{C_2}{C_1}$

Para obtener más precisión en la frecuencia del oscilador y más estabilidad frente a cambios de temperatura se utilizan cristales piezoeléctricos en el lazo de realimentación en lugar del circuito LC.

El efecto piezoeléctrico es un efecto que se da en algunos materiales como el cuarzo. Consiste en que al someter el material a una tensión mecánica aparece en él una oscilación eléctrica. Los cristales que se usan en aplicaciones de electrónica consisten en una pastilla de cuarzo montada entre dos electrodos y encapsulada en un paquete metálico. El símbolo y circuito equivalente de un cristal piezoeléctrico se muestran en la Figura 9.6.

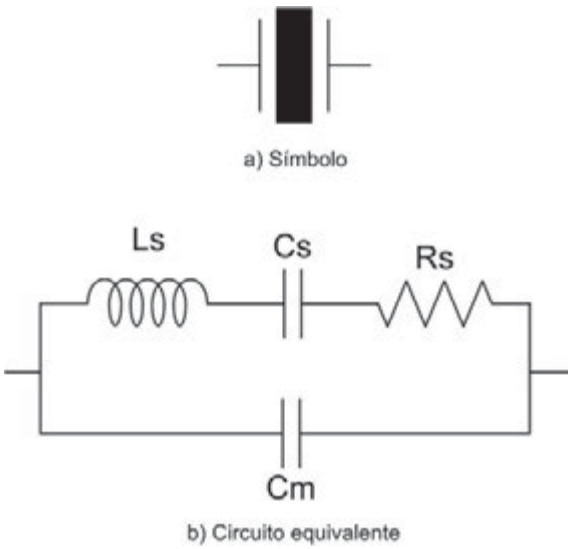


Figura 9.6. *Símbolo y circuito equivalente de un cristal piezoeléctrico*

¿SABÍAS QUE...?

En el caso de los ordenadores, el oscilador conectado en la placa base se encarga de generar los pulsos de alta frecuencia que proporcionan la velocidad de trabajo que requieren el microprocesador, los buses y el reloj del sistema. Dicho oscilador se compone de dos cristales de cuarzo. Pero no solo el ordenador contiene osciladores de cuarzo, sino también el ratón, el teclado y otros dispositivos inalámbricos.

La Figura 9.7 muestra un oscilador que utiliza un cristal en lugar de un circuito LC. El condensador C_C se utiliza para ajustar de forma precisa la frecuencia de oscilación, moviendo la frecuencia de oscilación del cristal un poco por encima o por debajo de su frecuencia natural de oscilación.

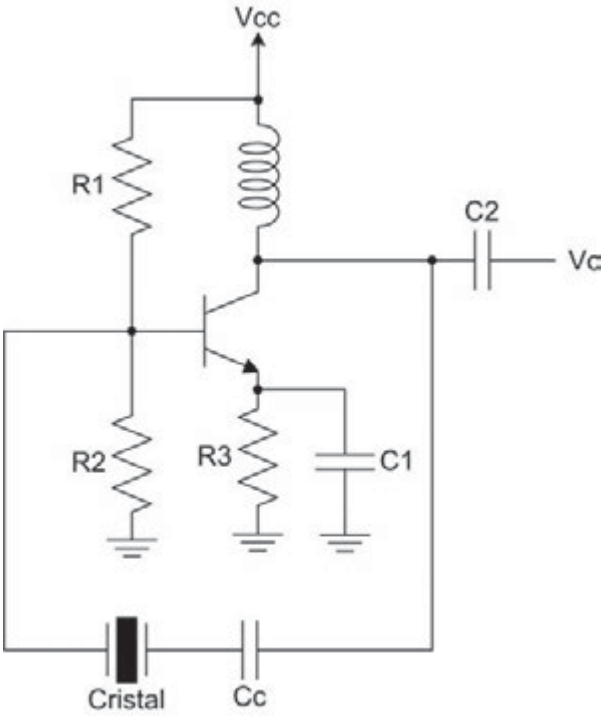


Figura 9.7. *Oscilador con cristal*

ACTIVIDADES 9.1

- ¿En qué ocasiones se utilizan los osciladores de cristal?
- ¿Qué dice el principio de Barkhausen?

9.1.3 OSCILADOR DE RELAJACIÓN

Se denominan osciladores de relajación a aquellos osciladores que basan su funcionamiento en la carga y descarga de un condensador. En el capítulo de componentes de electrónica de potencia ya se presentaron dos ejemplos de osciladores de relajación, uno con diodo Shockley y otro con un transistor UJT. Las formas de onda de aquellos osciladores no tenían una forma "útil", sino que eran simplemente la curva de carga y descarga de un condensador.

EJEMPLO 9.2

En este ejemplo se mostrará como construir un oscilador de relajación que genere una onda cuadrada, utilizando para ello un amplificador operacional.

En el circuito de la Figura 9.8, cuando se conecta la alimentación el condensador está descargado y por tanto el voltaje en la entrada inversora del operacional es 0 V, lo que hace que la salida del operacional esté en su valor máximo positivo. El condensador comenzará a cargarse a través de la resistencia R_1 para alcanzar el valor del voltaje de salida, pero cuando supere el voltaje de la entrada no inversora la salida del operacional pasará a ser su voltaje máximo negativo. En esta nueva situación el condensador, ya cargado positivamente, comenzará a cargarse hacia el voltaje negativo de la salida del operacional hasta que de nuevo el voltaje en la entrada inversora sea más pequeño que el de la entrada no inversora, momento en el cual la salida del operacional pasará de nuevo a su valor máximo positivo, iniciándose de nuevo la carga del condensador.

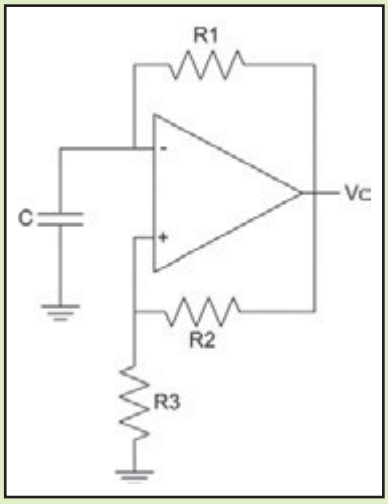


Figura 9.8. *Oscilador de relajación*

Un análisis más detallado del circuito permite ver como es la forma de onda exacta de la salida. Suponiendo valores de alimentación de +12 V y -12 V, y los siguientes valores para las resistencias y condensadores: $R_1 = R_2 = R_3 = 1$ KΩ y C = 4 nF, se obtiene que cuando la tensión de salida del operacional es +12 V el voltaje en la entrada no inversora es:

$$V_+ = V_o \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 6V$$

De forma similar, cuando la salida es -12 V el voltaje en la entrada no inversora es de -6 V. El condensador estará por tanto cargándose desde -6 V a 6 V, y luego descargándose de 6 V a -6 V.

Si se analiza la fase de carga del condensador se puede observar que es una carga a través de una resistencia en serie (nótese que se está suponiendo que no entra intensidad por la entrada no inversora,

y por tanto toda la intensidad que atraviesa el condensador pasa también por la resistencia R_1). En este tipo de carga, el voltaje del condensador en función del tiempo sigue una ecuación del tipo:

$$V_C(t) = V_F + (V_I - V_F)e^{-t/RC}$$

Siendo V_F el voltaje final al que tiende a cargarse el condensador (en este caso será +12 V) y V_I el voltaje inicial que hay en el condensador (en este caso -6 V). Por tanto: $V_C(t) = 12 + (-6-12)e^{-2.5\cdot 10^5 t} = 12 - 18e^{-2.5\cdot 10^5 t}$.

El condensador se cargará según la ecuación anterior hasta que alcance un voltaje de 6 V. Para calcular el instante de tiempo en el que esto sucede, se puede igualar la ecuación anterior a 6 V y despejar la variable *t*:

$$12 - 18e^{-2.5\cdot 10^5 t} = 6 \Rightarrow -18e^{-2.5\cdot 10^5 t} = -6 \Rightarrow e^{-2.5\cdot 10^5 t} = \frac{1}{3}$$

Tomando logaritmos neperianos se obtiene que:

$$e^{-2.5\cdot 10^5 t} = \frac{1}{3} \Rightarrow -2.5\cdot 10^5 t = -1.0986 \Rightarrow t = 4.4\cdot 10^{-6} s = 4.4 \mu s$$

Esto quiere decir que el tiempo que tarda el condensador en cargarse de -6 V a 6 V, y que coincide con el tiempo que está la salida a +12 V es de 4.4 microsegundos. Si se realiza el mismo análisis para la fase de descarga de 6 V a -6 V se obtiene el mismo resultado. Por tanto, la forma de onda de salida del oscilador de relajación es una onda cuadrada de +12 V a -12 V con un período de 8.8 μs, tal como se muestra en la Figura 9.9.

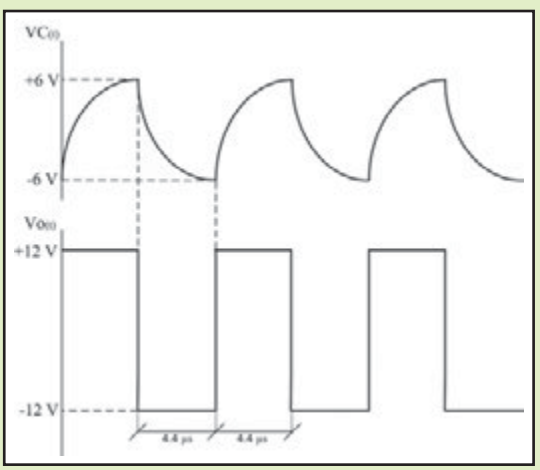


Figura 9.9. *Formas de onda en el oscilador de relajación*

ACTIVIDADES 9.2

- Enumera los tipos de osciladores vistos en el libro. Amplía esa información por Internet.
- ¿Qué es un oscilador controlado por tensión (VCO)?

9.1.4 PLLS

Un lazo de seguimiento de fase o **PLL** (*Phase-Locked Loop*), es un sistema electrónico que genera una señal que tiene una relación directa con la fase de una señal de referencia.

Un PLL responde tanto a la frecuencia como a la fase de una señal de entrada, aumentando o disminuyendo la frecuencia de un oscilador controlado por tensión hasta que este coincide en frecuencia con la señal de referencia, y la diferencia de fase entre ellas es constante.

Los PLL se usan mucho en aplicaciones de radio, comunicaciones, computadores y otras aplicaciones electrónicas. Algunas de las aplicaciones típicas de los PLL son generar señales de frecuencia muy estable o recuperar una señal de un canal muy ruidoso.

¿SABÍAS QUE...?

Una aplicación para la cual el PLL es insustituible es en la generación de frecuencias superiores a la frecuencia de la señal de entrada, que se consigue utilizando un divisor de frecuencias en el lazo de realimentación.

Los componentes básicos de un PLL son:

- **Detector de fase**: es un componente que compara dos señales de entrada y produce un voltaje de corriente continua que es proporcional a la diferencia de fase de las señales de entrada.
- **Filtro paso bajo**: se utiliza para suavizar los cambios bruscos a la salida del detector de fase.
- **Oscilador controlado por tensión** (**VCO**): es un tipo de oscilador que permite generar señales de frecuencia variable en función de un voltaje de corriente continua. Cuando no se aplica voltaje el oscilador da a su salida una onda de una frecuencia determinada, y mediante la aplicación del voltaje de continua permite aumentar o disminuir la frecuencia de su salida.
- **Divisor de frecuencia**: es un componente que permite obtener una onda de frecuencia inferior a otra onda de entrada.

En la Figura 9.10 se muestra un PLL, en este caso sin el divisor de frecuencias.

Figura 9.10. *Estructura de un PLL*

El funcionamiento del PLL es el siguiente. El detector de fase compara la fase de la entrada del PLL y de la salida del PLL, produciendo un voltaje proporcional a la diferencia de fases. Este voltaje de continua, después de pasar por el filtro paso bajo, hace de entrada del oscilador controlado por tensión haciendo que la salida de éste sea una onda de una determinada frecuencia. Cuando la salida del VCO y la entrada del PLL son de la misma frecuencia, la diferencia de fases será constante y por tanto la salida del detector de fase será también constante. En esa situación se dice que el PLL está "enganchado".

Cuando el PLL está enganchado, una variación en la frecuencia de la señal de entrada hace que el detector de fase dé una salida proporcional a la diferencia de frecuencia entre la salida del PLL y la nueva entrada. Esta nueva salida del detector de fase cambiará la entrada del VCO y por tanto la frecuencia de oscilación de éste, hasta que esta frecuencia sea igual a la de la entrada del PLL y por tanto el circuito se estabilice de nuevo teniendo a la salida una señal de la misma frecuencia que la de la entrada.

El PLL tiene unos márgenes de funcionamiento que indican las condiciones para que se produzca el enganche y este se mantenga:

Rango de captura: es el margen de frecuencia para las que el PLL puede llegar a engancharse.

Rango de bloqueo o *hold in*: es el margen de frecuencia para las que estando el PLL enganchado puede seguir variaciones lentas de la frecuencia de entrada. Es mayor que el rango de captura.

Para conseguir obtener a la salida frecuencias superiores a la de la entrada se puede utilizar un divisor de frecuencia en el lazo de realimentación, tal como se muestra en la Figura 9.11.

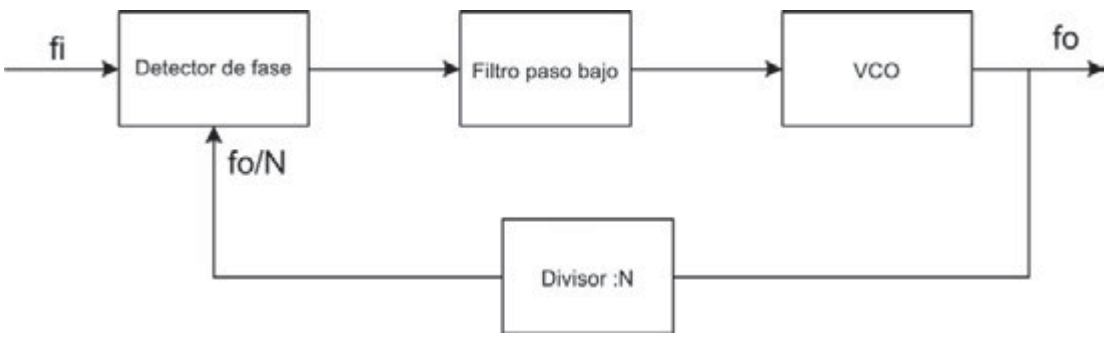


Figura 9.11. *PLL con divisor de frecuencias*

De esta forma se consigue que la frecuencia que se compara en el detector de fase no sea la de salida del PLL si no un submúltiplo de esta. Así, si por ejemplo se utiliza un divisor de frecuencia por 2 (la frecuencia de salida del divisor es la mitad de la frecuencia de entrada al divisor) se tendrá que cuando el PLL esté enganchado la frecuencia que hay a la salida del divisor es igual a la frecuencia de entrada del PLL, y por tanto esto significa que la frecuencia de salida del PLL es el doble de la frecuencia de entrada.

9.2 TEMPORIZADORES INTEGRADOS: EL CI 555

El circuito integrado 555 es un circuito muy popular que se utiliza para implementar distintos tipos de osciladores y temporizadores. Es un CI de 8 patillas con la siguiente numeración y nombres:

- 1- *Gnd* (Tierra).
- 2- *Trigger* (Disparo).
- 3- *Vo* (Salida).
- 4- *Reset*.
- 5- *Control* (Control de tensión).
- 6- *Threshold* (Umbral).
- 7- *Discharge* (Descarga).
- 8- *Vcc* (Alimentación).

En la Figura 9.12 se muestra la estructura interna del 555, que consta de 2 comparadores conectados a las entradas S y R de un biestable SR, 3 resistencias en serie que forman un divisor de tensión de la tensión de alimentación, y un transistor que permite o no la entrada de corriente por el terminal *discharge* dependiendo del valor de la salida del CI.

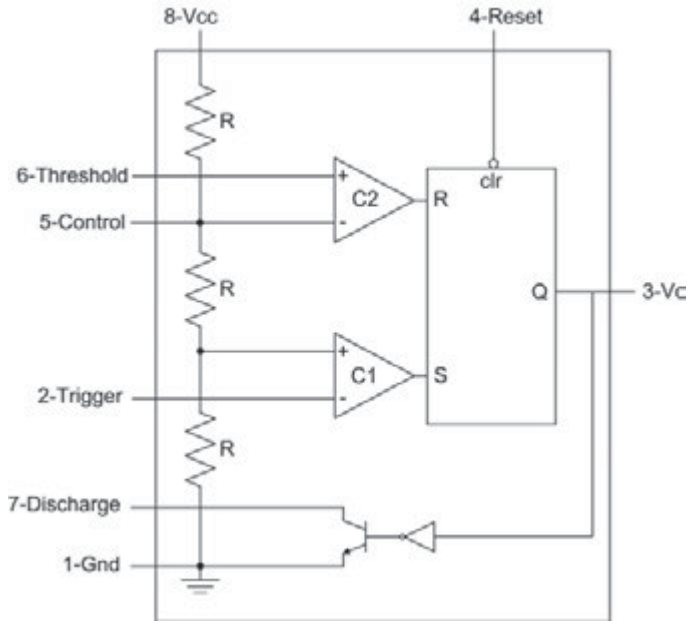


Figura 9.12. *Estructura interna y patillaje del CI 555*

El funcionamiento del CI 555 es el siguiente: si la entrada *reset* está a nivel bajo la salida del 555 está fija a nivel bajo, en caso contrario la salida dependerá de los valores de las entradas *threshold*, *trigger* y *control*. Para la aplicación del 555 que se mostrará en este capítulo no se hace uso de la entrada *control* así que para mostrar como es el funcionamiento del 555 solo se tendrán en cuenta las entradas *threshold* y *trigger*.

El comparador C1 compara *trigger* con $V_{cc}/3$ de tal forma que si *trigger*$<V_{cc}/3$ la entrada S del biestable está a nivel alto y por tanto la salida del biestable tomará también valor alto, además el terminal *discharge* no permite el paso de corriente al estar el transistor en corte. Si *trigger*$>V_{cc}/3$ la entrada S del biestable estará a nivel bajo y su salida dependerá del valor de la entrada R.

El valor de la entrada R del biestable depende del valor de *threshold*. El comparador C2 compara *threshold* con $2V_{cc}/3$ de tal forma que si *threshold*$<2V_{cc}/3$ la entrada R estará a nivel bajo y suponiendo que S también está en nivel bajo la salida del biestable mantendrá su valor. Si *threshold*$>2V_{cc}/3$ la entrada R del biestable estará a nivel alto y por tanto su salida tomará valor bajo, además el terminal *discharge* permitirá el paso de corriente al estar el transistor en saturación.

En la siguiente tabla se muestra un resumen del funcionamiento del 555 en función de sus diferentes entradas.

Si reset = 0	*Vo = 0* *Discharge* permite paso de corriente		
Si reset = 1	Si *trigger* < *Vcc/3*	*Vo = Vcc* *Discharge* no permite paso de corriente	
	Si *trigger* > *Vcc/3*	Si *threshold* < *2Vcc/3*	No hay cambio en *Vo*
		Si *threshold* > *2Vcc/3*	*Vo = 0* *Discharge* permite paso de corriente

9.2.1 FUNCIONAMIENTO COMO TEMPORIZADOR

La Figura 9.13 muestra un circuito temporizador con el integrado 555. El funcionamiento de este circuito se basa en la carga y descarga del condensador C a través de la resistencia R.

Cuando la salida del 555 está a nivel bajo, el terminal *discharge* está virtualmente conectado a tierra ya que el transistor interno está en saturación permitiendo el paso de corriente sin ofrecer casi resistencia. En esa situación el condensador C está descargado. Si se produce un pulso a cero en la entrada *trigger* la salida pasará a tomar valor alto, el transistor pasará a corte y no entrará corriente por *discharge* por lo que se comenzará a cargar el condensador C con una constante de tiempo RC. Cuando el condensador alcance un voltaje igual a $2V_{cc}/3$, la salida del 555 pasará a nivel bajo y el condensador se descargará rápidamente a través del terminal *discharge*.

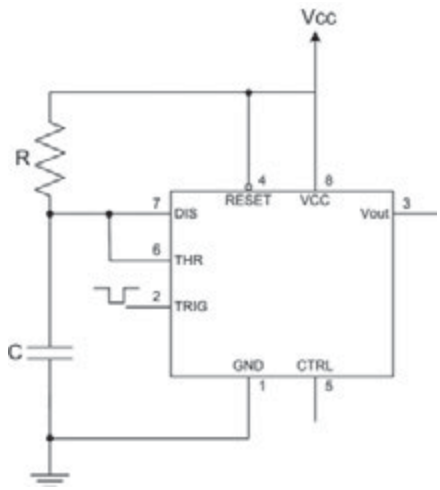


Figura 9.13. *Circuito temporizador con CI 555*

La Figura 9.14 muestra los voltajes en el condensador y la salida cuando se produce un pulso a cero en *trigger*. La duración del pulso de salida depende del valor de la resistencia y del condensador siendo este tiempo:

$$t = R \cdot C \cdot \ln(3)$$

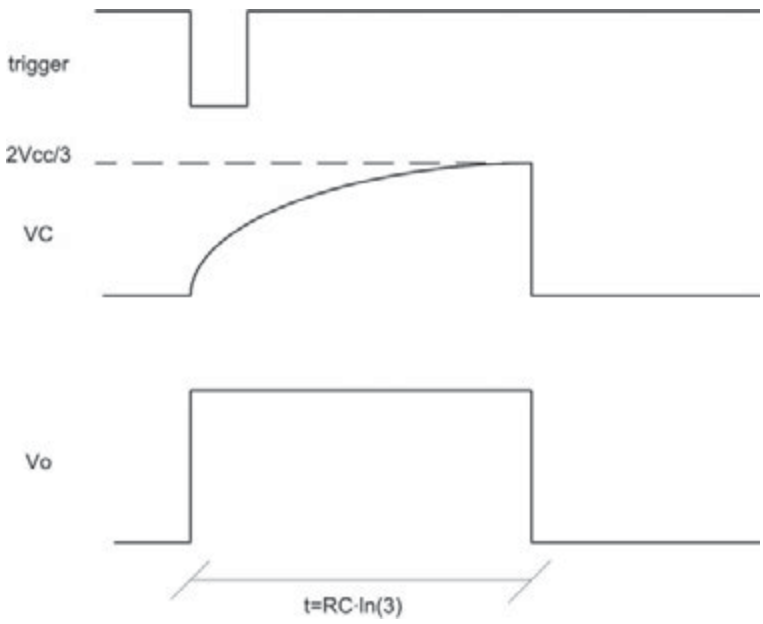


Figura 9.14. *Formas de onda para el circuito temporizador*

PRÁCTICA 9.1

TEMPORIZADOR CON CI 555

En esta actividad se realizará el montaje de un temporizador utilizando el circuito integrado 555. Para ello se necesita el siguiente material:

- ✓ 1 fuente de alimentación.
- ✓ Un circuito integrado 555.
- ✓ Un condensador electrolítico de 100 μF.
- ✓ Una resistencia de 50 KΩ.
- ✓ Dos resistencias de 1 KΩ.
- ✓ Un diodo LED.
- ✓ Un pulsador.

En la Figura 9.15 se muestra el montaje a realizar. Para este montaje, calcule cuanto tiempo durará el pulso de salida.

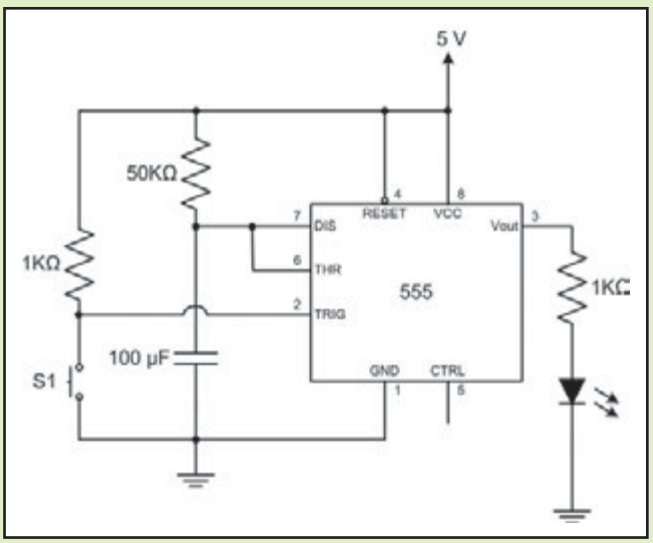


Figura 9.15. *Montaje temporizador con CI 555*

Realice el montaje prestando especial atención a la polaridad del condensador. El pulsador S1 se utiliza para disparar el 555. Una vez disparado el 555 el LED se encenderá y se mantendrá encendido mientras dure el pulso de salida. Cronometré aproximadamente el tiempo que está el LED encendido y compruebe si el valor coincide con el valor teórico calculado.

9.2.2 FUNCIONAMIENTO COMO OSCILADOR

La Figura 9.16 muestra un **circuito oscilador** de onda cuadrada utilizando el integrado 555. El funcionamiento de este circuito se basa en la carga del condensador C a través de R_1 y R_2 y en la descarga a través de R_2.

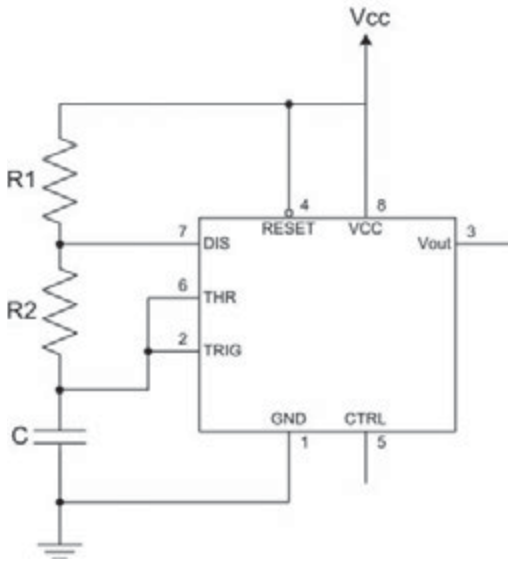


Figura 9.16. *Oscilador de onda cuadrada con CI 555*

Suponiendo la alimentación desconectada, el condensador C estará descargado. Al conectar la alimentación como el condensador C está descargado el voltaje en *trigger* es menor que $V_{cc}/3$ y por tanto la salida del integrado es alta y no entra corriente por el terminal *discharge*.

El condensador comenzará a cargarse a través de las resistencias R_1 y R_2. Cuando el voltaje del condensador, que es el mismo que el de los terminales *threshold* y *trigger*, alcance un valor de $2V_{cc}/3$ la salida del integrado pasará a 0 voltios y el terminal *discharge* permitirá el paso de corriente, por lo que el condensador comenzará a descargarse a través de la resistencia R_2. Cuando el condensador alcance un voltaje igual a $V_{cc}/3$, la salida del integrado pasará a valor alto, el terminal *discharge* ya no aceptará corriente y el condensador comenzará a cargarse de nuevo a través de R_1 y R_2 repitiéndose este proceso de carga y descarga de forma indefinida. La Figura 9.17 muestra las formas de onda de la tensión en el condensador y en la salida.

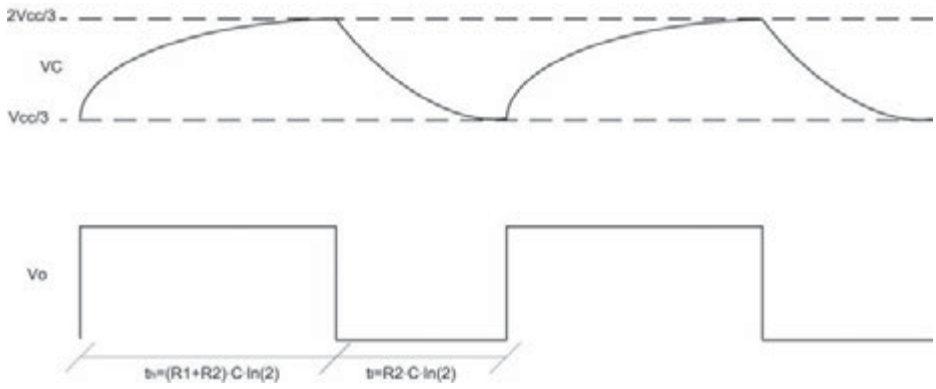


Figura 9.17. *Formas de onda para el oscilador de onda cuadrada*

El tiempo que está la salida en nivel alto viene dado por el tiempo que tarda en cargarse el condensador desde $V_{cc}/3$ hasta $2V_{cc}/3$ que es: $t_h = (R_1 + R_2) \cdot C \cdot \mathbf{ln}(\mathbf{2})$.

Y el tiempo que la salida está a nivel bajo es el tiempo que tarda en descargarse el condensador desde $2V_{cc}/3$ hasta $V_{cc}/3$ que es: $t_l = R_2 \cdot C \cdot \mathbf{ln}(\mathbf{2})$.

Por tanto, el período total de la salida será la suma de estos dos tiempos, y la frecuencia el inverso de este período:

$$f = \frac{1}{(R_1 + 2R_2) \cdot C \cdot \ln(2)}$$

Como el lector habrá observado, al ser el tiempo en nivel alto y el tiempo en nivel bajo diferentes la onda de salida no es simétrica. Si se desea obtener una onda lo más simétrica posible se puede conseguir haciendo que la resistencia R_2 sea mucho más grande que R_1.

RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se han presentado los fundamentos básicos de funcionamiento de los circuitos osciladores desde un punto de vista teórico, analizando el uso de realimentación positiva y las condiciones que deben cumplirse para que se produzca una oscilación y para que ésta se mantenga.

También se han visto ejemplos de osciladores concretos, como el oscilador de puente de Wien, el oscilador Colpitts, osciladores de relajación y PLL, así como el uso de cristales piezoeléctricos en osciladores.

También se ha presentado en detalle el funcionamiento de un circuito integrado muy popular, el CI 555, que puede hacer las veces tanto de oscilador como de temporizador.

EJERCICIOS PROPUESTOS

- **1.** Para el oscilador de puente de Wien de la Figura 9.18 calcule el valor de los condensadores y el valor de la resistencia R2 para que el oscilador oscile con una frecuencia de 500 KHz.

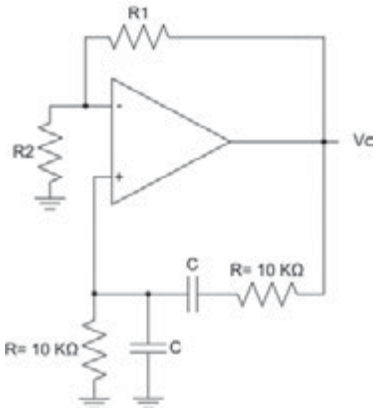


Figura 9.18. *Circuito para el ejercicio 1*

- **2.** Para el oscilador de relajación de la Figura 9.19 calcule el valor del condensador y el valor de la resistencia R2 para que la salida del oscilador sea una onda cuadrada de +12 V a -12 V con una frecuencia de 700 KHz y el condensador se cargue entre +5 V y -5 V. Suponga que la tensión de alimentación del operacional es de +-12 V.

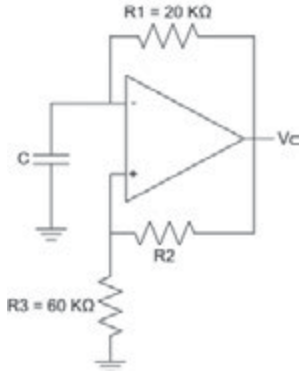


Figura 9.19. *Circuito para el ejercicio 2*

- **3.** Utilizando el circuito integrado 555 diseñe un temporizador que produzca un pulso positivo de 1 segundo de duración. Utilice para ello un condensador de 22 pF.
- **4.** Utilizando el circuito integrado 555 diseñe un oscilador que produzca una onda cuadrada de frecuencia 50 KHz y que tenga una simetría del 70% (70% del tiempo a nivel alto y 30% a nivel bajo). Utilice un condensador de 330 pF.
- **5.** Para el circuito de la Figura 9.20 calcule:
  - Tiempo que la onda de salida está a nivel alto, y tiempo que está a nivel bajo.
  - Frecuencia de la onda de salida.

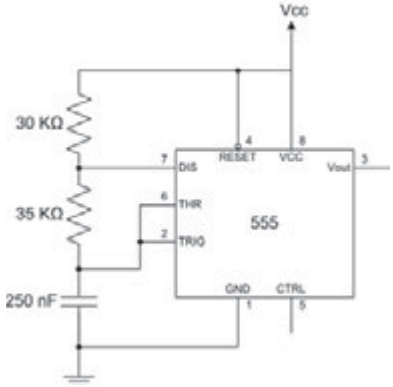


Figura 9.20. *Circuito para el ejercicio 5*

TEST DE CONOCIMIENTOS

1 Para que un oscilador se mantenga en el estado de oscilación la fase que introduce la red de realimentación positiva a la frecuencia de oscilación debe ser:
- a) Máxima.
- b) 180º.
- c) 0º.
- d) 90º.

2 Para que un oscilador se mantenga en el estado de oscilación la ganancia que introduce la red de realimentación positiva a la frecuencia de oscilación debe ser:
- a) Máxima.
- b) 1.
- c) Mínima.
- d) Igual al inverso de la ganancia del amplificador.

3 Para que un oscilador se mantenga en el estado de oscilación la ganancia en lazo cerrado del conjunto amplificador más red de realimentación debe ser:
- a) Máxima.
- b) 1.
- c) Mínima.
- d) 0.

4 Para que un oscilador arranque y comience la oscilación, la ganancia en lazo cerrado del conjunto amplificador más red de realimentación debe ser:
- a) Menor que 1
- b) Igual a 1.
- c) Mayor que 1.
- d) Mayor que 0.

5 Los osciladores de relajación son aquellos que basan su funcionamiento en:
- a) Circuitos LC resonantes.
- b) Cristales piezoeléctricos.
- c) Carga y descarga de condensadores.
- d) Ninguna de las anteriores.

6 Un PLL permite:
- a) Obtener una señal de frecuencia igual a la de la señal de entrada.
- b) Obtener una señal de frecuencia menor que la de la señal de entrada.
- c) Obtener una señal de frecuencia mayor que la de la señal de entrada si se utilizan los elementos apropiados en el lazo de realimentación.
- d) a) y c).

7 Los cristales piezoeléctricos permiten construir osciladores:
- a) Permiten construir osciladores menos sensibles a cambios de temperatura.
- b) Más precisos que los circuitos resonantes LC.
- c) Menos precisos que los circuitos resonantes LC.
- d) *a* y *b*.
- e) *a* y *c*.

8 En el circuito integrado 555, el terminal *discharge*:
- a) Permite el paso de corriente cuando la salida del 555 es alta.
- b) Permite el paso de corriente cuando la salida del 555 es baja.
- c) Siempre permite el paso de corriente.
- d) Nunca permite el paso de corriente.

10 Apéndice

CONTENIDO

- ✓ Señales digitales (ampliación)
- ✓ Dispositivos lógicos programables (ampliación)
- ✓ Tipos de codificaciones (ampliación)
- ✓ Parámetros de rendimiento de los rectificadores
- ✓ Análisis armónico. Filtros a inductor

10.1 SEÑALES DIGITALES (AMPLIACIÓN)

En el capítulo 1 se explicó que los sistemas digitales trabajaban con información binaria y dicha información se codificaba con valores de tensión. Generalmente al valor “0” se le asigna un valor de tensión bajo (VL) y al valor “1” se valor le asigna un valor alto (VH). Esta asignación recibe el nombre de lógica positiva. La asignación contraria recibe el nombre de lógica negativa. En el diseño de circuitos puede combinarse la lógica positiva y la lógica negativa, recibiendo el nombre de lógica mixta. Este libro se ha centrado en la forma más habitual: la lógica positiva.

Realmente, VL y VH no son valores precisos sino que son rangos de valores que dependen de la tecnología. Por ejemplo, en la tecnología CMOS VL toma valores entre 0 y 1 voltios y VH toma valores entre 3,5 y 5 voltios; mientras que en la tecnología TTL VL toma valores entre 0 y 0,8 voltios y VH toma valores entre 2 y 5 voltios. A los valores que se encuentran entre VL y VH se los denomina como zona de incertidumbre y los fabricantes no garantizan como el sistema interpreta la señal.

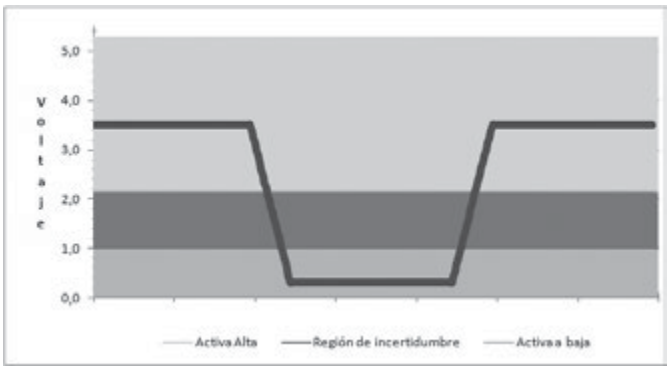


Figura 10.1. *Zonas de activación de un circuito C-MOS*

10.1.1 CONJUNTOS UNIVERSALES

Se denomina **conjunto universal** al conjunto de puertas lógicas con el que es posible implementar todas las funciones lógicas que se pueden generar en el álgebra de Boole (mediante los operadores complemento, producto y suma lógica). Se ha comentado que las leyes de De Morgan permiten sustituir todos los productos o sumas lógicas de una expresión, por este motivo, podemos concluir que el conjunto de puertas OR y NOT y el conjunto de puertas AND y NOT son universales. Las puertas NOR constituyen un conjunto universal en sí mismo. De igual forma lo hacen las puertas NAND tal y como puede comprobarse en la siguiente figura. Esto implica que se puede implementar cualquier función lógica utilizando exclusivamente puertas NOR o puertas NAND. Existen otros conjuntos universales como el formado por las puertas AND y XOR y el formado por las puertas OR y XOR.

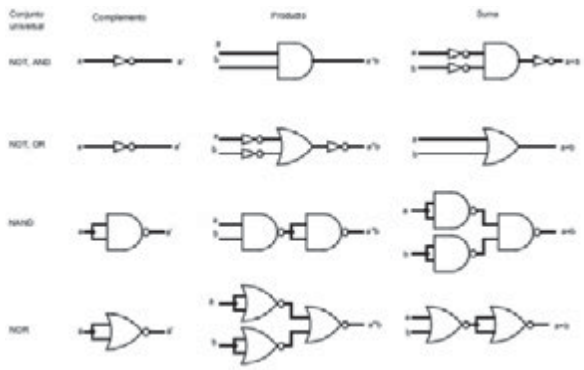


Figura 10.2. *Ejemplos de conjuntos universales*

En el capítulo 1 se explicó como a partir de una tabla de verdad se podía obtener expresiones lógicas en suma de productos (primera forma normal) o en producto de sumas (segunda forma normal). Destacar que las expresiones en suma de productos pueden implementarse directamente mediante puertas NAND y que las expresiones en forma de producto de sumas pueden implementarse directamente utilizando puertas NOR. La siguiente figura muestra la síntesis de la función expresada por la tabla 1.7 (ver capítulo 1) mediante puertas NAND utilizando la expresión de la primera forma normal y mediante puertas NOR utilizando la expresión de la segunda forma normal:

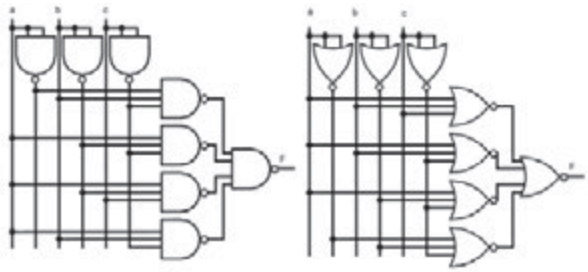


Figura 10.3. *Los dos circuitos son equivalentes. El de la izquierda implementa la primera forma normal y el de la derecha, la segunda*

10.2 DISPOSITIVOS LÓGICOS PROGRAMABLES (AMPLIACIÓN)

10.2.1 MEMORIAS ROM

Las **memorias ROM** son dispositivos de almacenamiento de uso común en los computadores y dispositivos electrónicos actuales. Como sus siglas en ingles indican (*Read Only Memory*) y a diferencia de otros dispositivos de almacenamiento como las memorias RAM y las memorias de disco, las memorias ROM solo pueden accederse en modo lectura. Las memorias ROM son bloques combinacionales con n entradas y k salidas, además de una o varias señales de activación. Cada valor de las entradas direccionan un valor de salida, es decir, a cada valor de las entradas le corresponde un valor de k bits. Estos valores se almacenan en la memoria.

El tamaño T de estas memorias viene determinado por el número de datos que se pueden direccionar con las 2^n entradas por el número de bits que tiene cada posición de memoria (k). De esta forma, $T = 2^n * k$.

Existen distintos tipos de memorias ROM: básicas (ROM), *Programable ROM* (*PROM*), *Erasable and Programable ROM* (*EPROM*) y *Electrically Erasable PROM* (*EEPROM*). Éstas pueden ser clasificadas atendiendo a distintos criterios:

- ✓ Según sus capacidades de programación: pueden ser programables por el usuario (PROM, EPROM o EEPROM) o ser programables exclusivamente por el fabricante (ROM).
- ✓ Según su capacidad de borrar datos: los datos pueden ser permanentes (ROM o PROM) o reprogramables (EPROM o EEPROM).
- ✓ Según la tecnología utilizada para el borrado y la programación: puede utilizarse luz ultra-violeta (EPROM) o pueden utilizarse señales eléctricas (EEPROM).

Las memorias ROM están compuestas por dos bloques. El primero de esos bloques está formado por 2^n puertas AND y n inversores. La salida de este bloque son los 2^n minitérminos que se pueden formar con las n entradas. Este bloque puede ser considerado como un decodificador de n entradas. El segundo bloque está formado por k puertas OR de 2^n entradas. Este bloque se puede programar indicando a que minitérminos se conecta cada puerta OR. De esta forma pueden implementarse funciones lógicas tal y como se ha detallado en apartados anteriores.

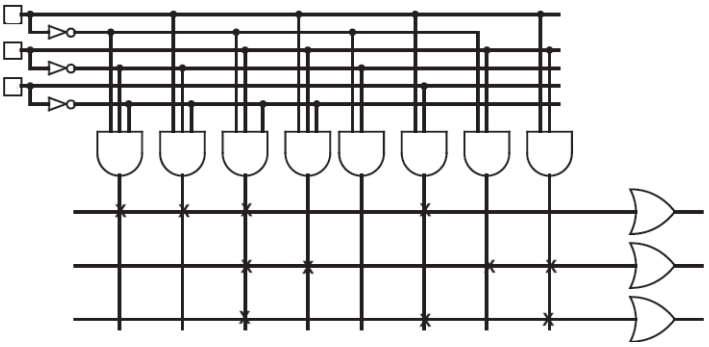


Figura 10.4. *Rom (n = 3, k = 3). Las cruces indican las uniones programadas por el usuario*

De forma abstracta, una memoria ROM puede verse como una tabla donde en cada una de sus entradas se almacena un valor de k bits. Puesto que la única parte programable es la del bloque de puertas OR, una menoría ROM puede representarse como una matriz de ceros y unos donde los unos indican que un minitérmino debe conectarse a una determinada puerta OR y los ceros representan una ausencia de conexión.

10.2.2 MATRICES LÓGICAS PROGRAMABLES (PLA)

La mayoría de los sistemas digitales no utilizan todos los minitérminos de las entradas en las funciones lógicas que describen su comportamiento, es más, en muchos casos se simplifica la expresión *booleana* eliminado literal de algunos minitérminos. En estos casos, el uso de memorias ROM es un desperdicio de dinero, recursos, espacio y consumo de potencia. En estos casos es aconsejable el uso de dispositivos **PLA**. La estructura de una PLA es muy similar a la de una memoria ROM, la diferencia estriba en que el primer bloque (el formado por las puertas AND y los inversores)

es programable. De esta forma, solo se implementarán los productos necesarios para definir las funciones lógicas del sistema y no todos los minitérminos de las entradas.

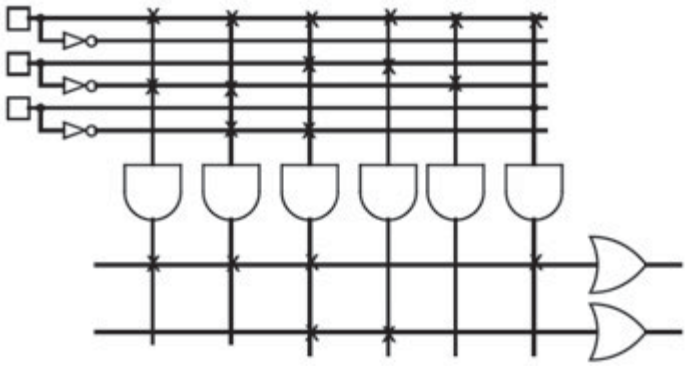


Figura 10.5. *PLA (n = 3, m = 6, k = 2). Las cruces indican las uniones programadas por el usuario*

Un caso particular de estos circuitos son los dispositivos **PAL** (*Programmable Array Logic*). En estos dispositivos, la matriz de puertas OR está prefijada y solo se pueden modificar las conexiones de las puertas AND. Los dispositivos PAL se caracterizan por n entradas, k salidas y m puertas AND. Cada una de las salidas de las puertas AND está conectada a una única puerta OR. De este modo, un dispositivo PAL suele tener k puertas OR de m/k entradas. Si disponemos de una PAL con 2 entradas, 6 puertas AND y 3 salidas, se podrán implementar como máximo 3 funciones lógicas de 2 operandos cada una y cada función lógica podrá tener como mucho 2 productos en suma.

10.3 TIPOS DE CODIFICACIONES (AMPLIACIÓN)

En este apartado se van a detallar los distintos tipos de codificaciones que existen. Estos criterios de clasificación permitirán al lector entender mejor los sistemas que se detallan en el capítulo 3. Una codificación puede pertenecer a uno o varios de los grupos que se detallan a continuación.

- **Sistemas de codificación directa**. Se establece una correspondencia biunívoca entre un conjunto de símbolos y un conjunto de códigos binarios. Es decir, a cada símbolo o idea que se desea representar le corresponde una secuencia de unos y ceros. En los sistemas de codificación directa con secuencias de n dígitos binarios (o bits) se pueden representar 2^n códigos, cada uno de ellos representa un símbolo del conjunto que se quiere representar. Por ejemplo, con secuencias de *2* bits se pueden generar 2^2 códigos binarios: 00, 01, 10 y 11, y por lo tanto, se podrán codificar 4 ideas o símbolos.
- **Sistemas de codificación por campos**. Esta codificación divide la secuencia de bits en campos. Cada campo tiene un significado específico dentro del sistema. Un ejemplo, que se detallará más adelante, es la representación de números enteros utilizando signo-magnitud. En esta codificación, el primer bit o bit de mayor peso codifica el signo y el resto, el valor absoluto o módulo del número que se está representando. De este modo, el 0001 representará el número natural 1 y el 1001 el -1.

- **Sistemas de codificación por secuencias de códigos**. Se dota de significado específico a parte de la información codificada y diferentes símbolos se representan mediante códigos de diferentes longitudes. Por ejemplo, para codificar con *2* bits los números enteros comprendidos entre -2 y 2, se pude escoger la siguiente codificación por secuencias de códigos: 00 = 0, 01 = 1, 10 = 2 y 11= -. De esta forma, el -1 se codificaría con dos códigos de la siguiente forma: 11 01.
- **Codificaciones uniformes o bloque**. En las codificaciones bloque todos los símbolos se representan con secuencias de la misma longitud. Por ejemplo, codificar los números enteros del 0 al 3 con dos bits: 00, 01, 10 y 11. En este caso, todos los códigos tienen dos bits.
- **Codificaciones no singulares**. Una codificación uniforme es no singular si en ningún caso a dos símbolos fuente les corresponde la misma palabra o código. Son codificaciones que carecen de ambigüedades. De esta forma un código será singular si utiliza la misma secuencia de bits para representar dos o más símbolos. Un código donde el valor infinito y el valor de código incorrecto se utilicen con la misma secuencia es singular.
- **Decodificación instantánea**. Un código es de decodificación instantánea si cada símbolo del mismo puede decodificarse sin ambigüedades y sin conocer los códigos que le preceden. De esta forma, la codificación vista en el punto cuatro de esta enumeración es un ejemplo de código que permite una decodificación instantánea, ya que dada una secuencia de números se puede decodificar cada símbolo de forma independiente a los demás. Por el contrario, el ejemplo visto en el punto 3 no permite la decodificación instantánea puesto que para conocer el valor de una codificación es necesario conocer el valor anterior para poder determinar si el número es positivo o negativo.
- **Codificación ponderada**. Un código ponderado es aquel en el que el valor de cada bit o dígito viene determinado por la posición que ocupa dentro de la palabra. Por ejemplo, en la codificación decimal de números naturales la posición de cada dígito influye en su valor. En el número 231, el valor del 2 es de 2*100, el valor del 3 es 3*10 y el valor del 1 es de 1.
- **Codificaciones densas**. Una codificación es densa si todas las posibles combinaciones de bits del código tiene significado. Por ejemplo, la codificación 00, 01, 10 y 11 es densa y por el contrario la codificación 00, 01 y 11 no lo es.
- **Codificaciones continuas**. Una codificación es continua si dos palabras consecutivas son adyacentes. Dos palabras son adyacentes si su distancia es *1*. Las distancias entre dos palabras es el número de bits que varía entre ambas. De esta forma, las distancia entre 11 y 00 es de 2, la distancia entre 01 y 10 es de 2, 11 y 10 son adyacentes, 11 y 01 son adyacentes, 00 y 01 son adyacentes y 00 y 10 son adyacentes. Siendo la codificación 00, 01, 11 y 10 continua.
- **Codificaciones cíclicas**. Una codificación es cíclica si la primera y la última palabra son adyacentes. Por ejemplo, la codificación 00, 11, 01 y 10 es cíclica.

10.3.1 CÓDIGOS CONTINUOS (AMPLIACIÓN)

Como ya sé comento en el capítulo 3, los códigos continuos más utilizados son el código de Gray y el código de Johnson. Ambos además de ser continuos son cíclicos, es decir, el primer y el último código son adyacentes.

El **código de Gray** se conoce como código reflejo. Dicho código puede construirse de forma recursiva. Puede construirse el código de Gray de n bits a partir del código Gray n-1 añadiendo un 0 a dicha codificación y un 1 al código reflejado.

Tabla 10.1. Construcción del código reflejo

1 bit →	Reflejo →	2 bits →	Reflejo →	3 bits
0	0	00	00	000
1	1	01	01	001
	1	11	11	011
	0	10	10	010
			10	110
			11	111
			01	101
			00	100

A partir de un código en binario puro ($b_{n-1}b_{n-2}\ldots b_0$) de n bits puede obtenerse su código de Gray ($g_{n-1}g_{n-2}\ldots g_0$) equivalente utilizando el siguiente algoritmo:

- Los bits más significativos de ambas cifras tienen el mismo valor ($g_{n-1} = b_{n-1}$).
- Para el resto de bits i tal que $i<n-1$, g_i toma el valor 0 si b_{i+1} y b_i son iguales y 1 en el otro caso ($g_i = b_{i+1}$ xor b_i).

Del mismo modo, a partir de un código de Gray ($g_{n-1}g_{n-2}\ldots g_0$) de n bits se puede obtenerse su equivalente en binario puro ($b_{n-1}b_{n-2}\ldots b_0$):

- Los bits más significativos de ambas cifras tienen el mismo valor ($b_{n-1} = g_{n-1}$).
- Para el resto de bits i tal que $i<n-1$, b_i toma el valor 0 si b_{i+1} y g_i son iguales y 1 en el otro caso ($g_i = b_{i+1}$ xor b_i).

Por último, destacar que el código de Gray tiene un gran número de aplicaciones entre las que destaca la ordenación de las variables de entrada en los mapas de Karnaugh, utilizados en la simplificación de funciones lógicas.

Por su parte, los **códigos Johnson** se caracterizan por poder representar $2n$ símbolos con n bits. La secuencia se genera desplazando todos los bits hacia la izquierda, el bit que se introduce en cada iteración por la derecha es el complementario del bit más significativo de la iteración anterior. En la siguiente tabla se muestran los códigos de Johnson de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 bits.

Tabla 10.2. Códigos de Johnson

2 bit	3 bits	4 bits
00	000	0000
01	001	0001
11	011	0011
10	111	0111
	110	1111
	100	1110
		1100
		1000

10.3.2 SISTEMAS DE REPRESENTACIÓN NUMÉRICA EN COMA FLOTANTE

Las representaciones en coma flotante están basadas en la notación científica y reservan p bits para codificar una mantisa y q bits para codificar un exponente. A partir de la **mantisa** M y el **exponente** E puede calcularse el valor del número representado X mediante la expresión $X = M * 2^E$.

En los sistemas en coma flotante, la mantisa debe codificar el signo. Si la mantisa es positiva, el número será positivo y si es negativa, el número será negativo. Para codificar la mantisa se suele utilizar un número fraccionario. De esta forma, M está compuesto por p_M bits enteros y q_M bits decimales. Del mismo modo, el exponente puede ser positivo o negativo. Si es negativo, el número representado es menor que la mantisa ($X < M$) y si es positivo, el número representado es mayor que la mantisa ($X > M$). El exponente codifica un número entero sin parte fraccionaria. Para codificar la mantisa y el exponente puede utilizarse cualquier codificación en coma fija de las vistas en apartados anteriores, pero es bastante común codificar la mantisa con el signo magnitud y el exponente en exceso a 2^{q-1}-1.

De esta forma, para definir un formato en coma flotante habrá que indicar como se codificará la mantisa y como se codificará el exponente. La codificación de la mantisa se determina indicando el número de bits que se utilizará, la posición de dichos bits en el código, la codificación que se empleará y la posición de la coma. La codificación del exponente quedará definida mediante el número de bits que utilizados, la posición de dichos bits en el código y la codificación empleada. Por ejemplo, si se utiliza una codificación en coma flotante en la que se reservan los 6 bits más significativos para la mantisa, dicha mantisa se codifica en signo magnitud, la coma se coloca a la derecha del bit más significativo y el exponente se codifica con los 2 bits menos significativos en exceso a 2, los códigos 01100111, 00001001 y 10000110 representarán los siguientes valores:

- 01100111. Primero se calcula el valor de la mantisa $M = +(1{,}1001)_2 = 1{,}5625$. En un segundo paso se calcula el valor del exponente $E = (11)_{E2} = 3 - 2 = 1$. Por último, se combinan ambos valores $X = 1{,}5625 * 2^1 = 3{,}125$.
- 00001001. Primero se calcula el valor de la mantisa $M = +(0{,}0010)_2 = 0{,}125$. En un segundo paso se calcula el valor del exponente $E = (01)_{E2} = 1 - 2 = -1$. Por último, se combinan ambos valores $X = 0{,}125 * 2^{-1} = 0{,}0625 = 6{,}25 * 10^{-2}$.
- 10000110. Primero se calcula el valor de la mantisa $M = -(0{,}0001)_2 = -0{,}0625$. En un segundo paso se calcula el valor del exponente $E = (10)_{E2} = 2 - 2 = 0$. Por último, se combinan ambos valores $X = -0{,}0625 * 2^0 = -0{,}0625 = -6{,}25 * 10^{-2}$.

Como el lector habrá podido observar, la notación en coma flotante es redundante, es decir, varios códigos representan el mismo valor. En el ejemplo anterior, los códigos 00001001 y 00000110 tiene el mismo valor: $0{,}125 * 2^{-1} = 0{,}0625 * 2^0 = 6{,}25 * 10^{-2}$. Incrementar el exponente implica desplazar la mantisa hacia la derecha de la coma y decrementarla supone desplazar la mantisa hacia la izquierda de la coma: $0{,}100 * 2^1 = 1{,}000 * 2^0 = 0{,}010 * 2^2$. Para evitar esta redundancia, la mantisa suele estar normalizada. Se dice que una mantisa está normalizada cuando su valor absoluto se encuentra dentro de un intervalo predefinido. Las dos normalizaciones más frecuentes son:

- $1 \leq |M| < 2$. Se obliga a que el valor de la mantisa se encuentre entre 1 y 2. En esta representación siempre hay un 1 como bit más significativo a la izquierda de la coma. De esta forma, las mantisas $(1{,}0001)_2$, $(-1{,}1000)_2$ y $(1{,}0000)_2$ estarían normalizadas y las mantisas $(0{,}0001)_2$, $(-0{,}1000)_2$ y $(0{,}0000)_2$ no lo estarían.
- $0{,}5 \leq |M| < 1$. Se obliga a que el valor de la mantisa se encuentre entre 0,5 y 1. En esta representación siempre hay un 1 como bit más significativo a la izquierda de la coma. De esta forma, las mantisas $(0{,}1001)_2$, $(0{,}1000)_2$ y $(-0{,}1111)_2$ estarían normalizadas y las mantisas $(1{,}0000)_2$, $(-0{,}0100)_2$ y $(0{,}0000)_2$ no lo estarían.

En ambos casos, los valores de los bits más significativos se repiten en todas las mantisas. En la primera siempre hay un 1 a la izquierda de la coma (1,…) y en la segunda siempre hay un 1 a la derecha de la coma (0,1…). Por este

motivo se puede ahorrar espacio en la codificación si no se almacenan. Este bit no almacenado recibe el nombre de bit implícito. Por ejemplo, si se normaliza la mantisa entre 1 y 2, las mantisas +1,0000, -1,0000, +1,1111 y -1,0101 podrán almacenarse en signo magnitud con 5 bits como: 00000, 10000, 01111 y 10101 respectivamente, sabiendo que el bit más significativo es el signo.

El bit implícito suele utilizarse porque nos permite aumentar el rango de valores representables, pero tiene una gran limitación: impide representar el cero y un intervalo de números alrededor del mismo. Si M_{Mp}, M_{mp}, M_{Mn}, M_{mn}, *EXP* y *exp* son la mayor mantisa positiva representable, la menor mantisa positiva representable, la menor mantisa negativa, la mayor mantisa negativa, el mayor exponente y el menor exponente respectivamente, el rango de valores positivos de una representación en coma flotante puede definirse como $[M_{mp} * 2^{exp}, M_{Mp} * 2^{EXP}]$ y el negativo como $[M_{Mn} * 2^{EXP}, M_{mn} * 2^{exp}]$. En este caso, el intervalo de valores no representables entorno al cero será $(M_{mn} * 2^{exp}, M_{mp} * 2^{exp})$. La mayoría de las representaciones en coma flotante utilizan valores especiales para poder representar el cero y valores cercanos. Estos valores especiales se definen por una mantisa y un exponente determinados.

El formato en coma flotante más utilizado es el estándar IEEE 754. Esta representación define dos tamaños: el tamaño de precisión simple (32 bits) y el tamaño de doble precisión (64 bits). En ambos casos la mantisa se representa en signo magnitud y el exponente en exceso a 2^{q-1}-1 (127 en simple precisión y 1023 en doble precisión). La mantisa se normaliza entre 1 y 2 y se utiliza el bit implícito. En simple precisión se reservan 8 bits para el exponente, 23 para el módulo y 1 para el signo y en doble precisión ser reservan 10 para el exponente, 1 para el signo y 53 para la mantisa. Además, se definen los siguientes casos especiales:

- El cero se representa con todos los bits del exponente a 0 (E = 0..00) y todos los bits de la mantisa a 0 también (M=0..00).
- Si todos los bits del exponente están a 0 y la mantisa toma un valor distinto de cero, el valor de la mantisa se calculará sin tener en cuenta el bit implícito y exponente se calculará restando el exceso menos 1, es decir, en simple precisión valdrá -126 y en doble precisión -1022. Este caso se utiliza para representar números cercanos al cero, permitiendo no normalizarlos.
- El infinito positivo se representa con todos los bits del exponente a 1, todos los bits del módulo a 0 y el bit de signo a 0.
- El infinito negativo se representa con todos los bits del exponente a 1, todos los bits del módulo a 0 y el bit de signo a 1.
- Valores incorrectos (como una división por cero) pueden representarse poniendo todos los bits del exponente a 1 y algún bit de la mantisa a uno también. Esta representación recibe el nombre de NaN (*Not a Number*).

¡El lector habrá podido apreciar que la resolución de las codificaciones en coma fija no es uniforme en todo el rango. Cuanto mayor sea el número, peor será la resolución. La resolución depende del exponente E y del valor del bit menos significativo de la mantisa f: $2^{-f} * 2^{E} = 2^{E-f}$. De esta forma si se utiliza redondeo al más próximo, el error absoluto máximo e_a puede definirse como $e_a = 2^{E-f-1}$ e igual a la resolución en el resto de los casos. El error relativo máximo e_r no depende del exponente y siempre será inferior a 2^{-f}.

A la hora de definir una representación, también es importante indicar que bits de la codificación se dedican al módulo, que bits se dedican al signo y que bits se dedican al exponente. Casi siempre, se utiliza uno de estos dos formatos:

- **Directo**: el bit más significativo es el signo, después se coloca el módulo y por último se emplaza el exponente.
- **Comparación rápida**: al igual que en la representación anterior primero se emplaza el signo en el bit más significativo, después el exponente y por último el módulo. Esta codificación recibe el nombre de comparación rápida puesto que permite comparar dos números fijándonos en los bits más significativos y utilizando los menos significativos para desempatar. El formato IEEE 754 utiliza comparación rápida.

Los formatos en coma fija suelen utilizarse para codificar números enteros. El principal motivo es que las operaciones con números en coma fija son mucho más rápidas. Por otro lado, los formatos en coma flotante suelen utilizarse para representar números reales porque el rango de la representación es mucho mayor. Este tipo de codificaciones permiten representar números positivos y negativos con valores absolutos muy grandes o muy pequeños. Además, la resolución no es uniforme en todo el rango y se adapta al valor absoluto del número representado.

10.3.3 OTROS SISTEMAS DE REPRESENTACIÓN

La elección de una codificación no solo depende de la naturaleza de la información que se desea codificar, sino del uso que se quiera hacer de la misma. Al manipular información o al transformarla ésta puede degradarse. En estos casos, la capacidad de detectar es esencial para poder confiar en los resultados obtenidos. Existen codificaciones que permiten detectar e incluso corregir estas situaciones. Para ello es necesario añadir información redundante a los datos. La información redundante se añade utilizando normas establecidas por convenio. El proceso de detección de errores consiste en comprobar que la redundancia es coherente con los datos a los que se asocia. Si no se cumple el convenio, está claro que se ha producido un error. En algunos casos en que el convenio se cumpla, no asegura que no se haya producido ningún error. Por ejemplo, un sistema genera un dato *D* y le añade información redundante *R*, después envía dichos datos a un segundo sistema. El segundo sistema recibe *D'* y *R'*, no podemos garantizar que los datos recibidos coincidan con los enviados. El sistema receptor calculará la información redundante de *D'* (*R"*). Si *R"* y *R'* no coinciden, el sistema asumirá que se ha producido un error en la comunicación. En otro caso se asumirá que la trasmisión fue correcta. Aunque en algunos casos no pueda garantizarse.

Existen distintos métodos para detectar errores. El método más sencillo es el **método de votación**. Dicho método se basa en repetir la información original *n* veces, siendo *n* un número impar. Si las copias son iguales se asume que la información es correcta. Si la información no coincide se considera que la mayoría de las copias serán correctas y se recupera la información. Este método no es muy utilizado por la gran cantidad de información redundante que se añade.

Otras codificaciones añaden un menor número de bits redundantes. Uno de los mecanismos más utilizados es la **paridad**. Los mecanismos basados en paridad cuentan el número de unos del código. Existen dos tipos de paridades: par e impar. En sistemas de paridad par se añade un bit, este bit valdrá 1 si el número de bits del código igual a 1 es impar (siendo el número total de unos par) y valdrá 0 en el otro caso. Los sistemas de paridad impar funcionan al contrario. Estos sistemas son capaces de detectar errores si cambia un número impar de bits. La paridad en sí misma no sirve para detectar errores, pero si se combinan distintos bits de paridad se pueden corregir errores. Este es el caso de los códigos de Hamming. Actualmente son también populares los **comparadores de redundancia cíclica** (**CRC**). Dichos códigos reciben información de un tamaño variable y devuelven un código de redundancia de tamaño fijo. Estos códigos permiten verificar que los datos recibidos son correctos. Es habitual que se combinen distintas técnicas de redundancia.

La manipulación de la información tiene un coste proporcional a su tamaño. Este tamaño es especialmente crítico en sistemas de almacenamiento de información y en la transmisión de datos entre computadores. Determinadas codificaciones permiten comprimir la información reduciendo su tamaño. Los algoritmos de compresión se pueden clasificar en dos tipos: sin pérdida de información y con pérdida de información. En los algoritmos sin pérdidas, la información original puede recuperarse completamente mediante un proceso de descompresión. Por otro lado, en los algoritmos con pérdida al descomprimir la información, no se recupera exactamente la original. Estos últimos algoritmos son útiles para comprimir audio e imagen. En muchas ocasiones cuando los datos son parecidos, el ser humano no es capaz de distinguirlos. En la actualidad, los sistemas de imagen pueden representar más colores de los que el ser humano es capaz de distinguir. La pérdida de precisión en estos casos no empeora sustancialmente la calidad de la imagen. Por este motivo, los algoritmos de compresión con pérdida de información son interesantes.

Dentro de los algoritmos de codificación que permiten comprimir la información sin pérdida destacan los algoritmos de codificación estadística. Estos analizan que codificaciones se utilizan con mayor frecuencia y les reasignan codificaciones de menor longitud, reduciendo el número medio de bits por dato. Dentro de este grupo de técnicas destacan los códigos de Huffmann. Cuanto más homogéneos sean los datos, es decir, cuanto menor sea su entropía, mayor será la tasa de compresión de estos algoritmos.

La **codificación diferencial** también permite reducir el tamaño de la información. En este tipo de codificación, un dato se obtiene sumando un valor a su antecesor. Este tipo de codificaciones asume que los datos tienen valores homogéneos y el incremento de un valor a otro puede codificarse con menos bits que el dato original. En estos sistemas la tasa de compresión es fija.

Destaca también la **compresión basada en diccionarios**. En estos sistemas, los códigos resultantes tienen longitud fija, y cada código representa una secuencia de datos presentes en la información original. Ejemplos de este tipo de codificaciones son el *Run lenth encoding* (RLE) y el *Lempel-Ziv-Welch* (LZW).

Todos los sistemas de codificación numérica, compresión y redundancia vistos en este tema pueden utilizarse para representar información de distinta naturaleza. Destaca la codificación de señales que puede realizarse utilizando vectores y matrices de números. Muchos tipos de información pueden codificarse como señales, por ejemplo el audio, el vídeo, las imágenes, etc. Una imagen no es más que una matriz de números que codifican un color. Cada número puede codificar un color en sí mismo, un conjunto de valores que codifiquen el color o un índice que permite recuperar el color de una tabla donde se almacenan todos los colores de la imagen. Suele ser habitual que los colores se codifiquen mediante distintos valores. El sistema RGB utiliza el rojo, verde y azul para codificar el color, ocasionalmente se puede añadir un cuarto valor para codificar la trasparencia. Los distintos formatos de codificación de imágenes se diferencian en como codifican el color de cada píxel y en como comprimen dicha información. De este modo existen algoritmos sin compresión como el BMP, algoritmos con compresión sin pérdida como el TIFF o algoritmos de compresión con pérdida como el JPEG.

10.4 PARÁMETROS DE RENDIMIENTO DE LOS RECTIFICADORES

Dentro de los rectificadores del capítulo seis, se puede establecer una serie de parámetros de las señales rectificadas que permitan comparar su efectividad y comportamiento.

El **valor medio** de una señal alterna $v(t)$ a lo largo de un período T se define como:

$$\bar{v}(t) = \frac{1}{T} \cdot \int_T v(t) \cdot dt$$

Y el **valor cuadrático medio** de $v(t)$, también llamado **valor efectivo** o **rms** (del inglés *root mean square*) está definido por:

$$v_{ef}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_T v^2(t) \cdot dt}$$

Otro parámetro importante al estudiar los rectificadores a diodo es el **voltaje pico inverso**, definido como el voltaje máximo que un diodo tiene que soportar en polarización inversa durante el funcionamiento del rectificador. Este valor es importante puesto que los diodos tienen una limitación en la diferencia de potencial máxima entre sus terminales que son capaces de soportar cuando están inversamente polarizados, sin sufrir daño.

10.5 ANÁLISIS ARMÓNICO. FILTROS A INDUCTOR

Otro tipo de análisis muy útil para filtros más complejos es el análisis armónico. Este consiste en descomponer la señal alterna que sale del rectificador en sus componentes frecuenciales.

La suma en serie de frecuencias de la salida de un rectificador de onda completa es:

$$v_L(t) = \frac{2 \cdot V_m}{\pi} - \frac{4 \cdot V_m}{3 \cdot \pi} \cdot \cos(2\varpi t) - \frac{4 \cdot V_m}{15 \cdot \pi} \cdot \cos(4\varpi t) - \ldots$$

de forma que el segundo armónico (de frecuencia $2 \cdot f$ es dominante, y en la mayoría de los casos no es necesario considerar los armónicos superiores).

Para el rectificador de media onda, la descomposición en frecuencias es:

$$v_L(t) = \frac{2 \cdot V_m}{\pi} - \frac{4 \cdot V_m}{3 \cdot \pi} \cdot \cos(2\varpi t) - \frac{4 \cdot V_m}{15 \cdot \pi} \cdot \cos(4\varpi t) - \ldots$$

y en este caso es necesario normalmente considerar los dos primeros armónicos (de frecuencias f y $2 \cdot f$).

A continuación se emplea el análisis armónico para obtener el factor de rizado en un filtro a inductor (también denominados **choques** cuando se emplean en filtrado). Sea un circuito como el de la Figura 6.15, con una resistencia de carga de 1 K y un inductor de filtrado de 10 H. Se analizan por separado la componente continua y el segundo armónico (dominante).

En continua, la bobina es un cortocircuito luego toda la tensión caerá en la resistencia de carga.

$$V_{L,f=0} = 0$$

$$V_{R,f=0} = \frac{2 \cdot V_m}{\pi}$$

En el segundo armónico, calculamos en primer lugar la intensidad que circula la carga. La impedancia combinada de de la resistencia y la bobina es:

$$Z_{RL} = R + j \cdot 2 \cdot \omega \cdot L \Rightarrow |Z_{RL}| = \sqrt{R^2 + (2 \cdot \omega \cdot L)^2} = 6362{,}18\Omega$$

de manera que la intensidad que circulará por la carga será:

$$I = \frac{\frac{-4 \cdot V_m}{3 \cdot \pi}}{|Z_{RL}|} = -6{,}67 \cdot 10^{-5} \cdot V_m$$

y la caída de tensión en la resistencia de carga:

$$V_{R,f=100Hz} = R \cdot I$$

Como se aproxima toda la señal alterna en la resistencia por este segundo armónico, que es el dominante, esa caída de tensión es igual a la tensión de rizado. Al ser una onda senoidal es posible obtener directamente su valor eficaz como:

$$V_{r(ef)} = \frac{R \cdot I}{\sqrt{2}}$$

y calcular el factor de rizado:

$$F_r = \frac{V_{r(ef)}}{\overline{V}_L} = \frac{V_{r(ef)}}{\frac{2 \cdot V_m}{\pi}} = 0{,}074 \Rightarrow F_r = 7{,}4\%$$

Índice Alfabético

A

Algebra de Boole, 14
Amplificador operacional, 220, 221
ASCII, 92
Asociación de bobinas, 113
Autoinducción, 112

B

Base, 133
Base común, 157
BCD, 91
Biestable, 50, 52
Biestable D, 53, 59
Biestable J-K, 53, 59
Biestable S-R, 53
Biestable T, 53, 61
Binaria, 12
Binario puro, 85
Bit, 78
Bobina, 98, 112
Byte, 78

C

Capacidad, 104
Capacitor, 104
Choque, 282
Ciclo de reloj, 51
Ciclo de trabajo, 188
Circuito derivador, 236
Circuito integrador, 235
Circuito combinacional, 50
Circuito secuencial, 50
Codificación cíclica, 276
Codificación continua, 276
Codificación densa, 276
Codificación diferencial, 281
Codificación no singular, 276
Codificación ponderada, 276
Codificación uniforme, 276
Codificador, 38
Coeficiente beta, 137
Colector, 133
Colector común, 157
Coma fija, 83
Coma flotante, 83
Comparadores de redundancia cíclica, 280
Complemento, 14
Complemento a 1, 87
Complemento a 2, 88
Componente activo, 98, 115
Componente electrónico, 98
Componente pasivo, 98
Compresión basada en diccionarios, 281
Computador, 10, 41
Condensador, 98, 104
Conjunción, 16
Conjunto universal, 272
Conmutación forzada, 203
Contador, 63
Control del inversor, 188
Conversor analógico/digital, 11
Conversor digital/analógico, 11
Convertidor, 246
Corriente de enganche, 201
Corriente de mantenimiento, 198, 201
Corriente inducida, 172
CRC, 280
Cronograma, 13

D

Datasheet, 19
Decodificación instantánea, 276
Decodificador, 37
Demultiplexor, 35

Desplazador, 40
Detector, 41
DIAC, 206
Dígito, 78
Diodo, 120
Diodo LED, 125
Diodo Shockley, 198
Diodo zéner, 124, 184
Disparo del tiristor, 201
Dispositivo lógico programable, 41
Disyunción, 16
Divisor de frecuencia, 68
Dopado, 115
Dopado de semiconductores, 118

E

Elemento neutro, 17, 18
Emisor, 133
Emisor común, 157
Error absoluto, 82
Error relativo, 82
Exceso a M, 90
Exponente, 278

F

Factor de rizado, 178
Filtrado, 171
Filtro activo, 237
Filtro paso alto, 241
Filtro paso bajo, 238
Filtro paso banda, 243
Flanco, 13
Flanco de reloj, 51
Framerate. *Véase* Fotogramas por segundo
Frecuencia de reloj, 51
Fuente conmutada, 170
Fuentes de alimentación lineales, 169

G

Ganancia, 225
Generador de paridad, 41

H

Huecos, 134

I

Impedancia de entrada, 225
Impedancia de salida, 225
Impurezas aceptoras, 118
Inductancia, 112
Inductor, 112
Inductor primario, 172
Inductor secundario, 172
Inversor, 188
Inversor de medio puente, 188
Inversor de puente completo, 188
Inversor en contrafase, 188
Inversor push-pull, 188
Inversotr flyback, 188
Involución, 18

K

Karnaugh, 30

L

LED, 125
Ley de Biot-Savart, 172
Ley de Faraday, 172
Ley de Lenz, 172
Ley de Ohm, 98
Leyes de De Morgan, 18
Limitador de intensidad, 169
Literal, 26

M

Magnitud, 10
Magnitud analógica, 10
Magnitud digital, 10
Mantisa, 278
Mapa de Karnaugh, 30
Material semiconductor, 115
Maxitérmino, 26
Memoria ROM, 273
Método de votación, 280
Minitermino, 26
Modelo de pequeña señal, 154
MUA. *Véase* Agente de usuario de correo
Multímetro, 42
Multiplexores, 32

N

NPN, 133

O

Oscilador, 252, 266
Oscilador Colpitts, 255
Oscilador de puente de Wien, 253

P

PAL, 275
Paridad, 280
PLA, 274
Placa de inserción, 43
PLL, 261
PNP, 133
Polarización del diodo, 122
Portador mayoritario, 134
Portador minoritario, 134
Precisión, 82
Primera forma normal, 26
Principio de dualidad, 17
Producto lógico, 15
Productos de sumas, 26
Propiedad asociativa, 17
Propiedad conmutativa, 17
Propiedad distributiva, 17
Puente de diodos, 176
Puertas lógicas, 21
Pulso, 13
Pulso de reloj, 51
Punto de polarización, 143
Punto de valle, 213

Q

Quine-McCluskey, 30

R

Rango, 82
Razón de transformación, 172
Realimentación negativa, 226
Rectificación, 171
Rectificador, 174
Rectificador de media onda, 174
Rectificador de onda completa, 175
Redes inalámbricas. *Véase* IEEE 802.11
Redondeo, 83
Registro, 68
Registro de conversión, 71
Región activa, 142
Región de corte, 141
Región de saturación, 142
Regulación, 171
Regulador, 184
Regulador lineal, 169, 171
Relé, 114
Reloj, 13
Resistencia, 43, 98
Resistencia fija, 99
Resistencia variable, 102
Resistor, 98
Resolución, 82
rms, 281

S

Seguidor de emisor, 159
Segunda forma normal, 26
Semiconductor, 115
Semiconductores extrínsecos, 118
Señal, 10
Señal de enable, 52
Señal de reloj, 51
Señales asíncronas, 63
Shockley, 198
Signo-magnitud, 86
Sincronismo, 51
Sistema decimal, 79
Sistemas combinacionales, 31
Sistemas de codificación directa, 275
Sistemas de codificación por campos, 275
Sistemas de codificación por secuencias de códigos, 276
Sistemas secuenciales, 31
Sistemas secuenciales asíncrono, 51
Sistemas secuenciales síncrono, 51
Suma de productos, 26
Sumador completo, 41
Sumador elemental, 41
Suma lógica, 15

T

Tabla de verdad, 24
Temporizador, 252, 263
Tensión de rizado, 177
Tensión eléctrica, 43
Tensión zéner, 184
Teorema de absorción, 18
Teorema idempotencia, 18
Teorema identidad, 18
Teoría de bandas, 116
Término en producto, 26
Término en suma, 26
Tester, 42
Tiristor, 200
Tolerancia, 100, 101
Transformación, 171
Transformador, 172
Transistor, 19
Transistor bipolar, 132
Transistor de audio, 140
Transistor de conmutación, 140
Transistor de potencia, 140
Transistor de propósito general, 140
Transistor de radiofrecuencia, 140
TRIAC, 209

U

UJT, 212
Unicode, 93
Unión de semiconductores, 120
Unión pn, 120

V

Valor cuadrático medio, 281
Valor efectivo, 281
Valor medio, 281
Varicap, 124
Voltaje de ruptura en directa, 198
Voltaje pico inverso, 282

La presente obra está dirigida a los estudiantes del Ciclo Formativo de Grado Medio de **Instalaciones Eléctricas y Automáticas**, en concreto para el Módulo Profesional **Electrónica**.

Los contenidos incluidos en este libro abarcan los conceptos básicos de la electrónica: sistemas digitales, tipos de circuitos secuenciales y analógicos, representación de la información, componentes electrónicos pasivos (resistencias, condensadores y bobinas) y activos (semiconductores, diodos y transistores), fuentes de alimentación, circuitos de control de potencia, amplificadores, osciladores y temporizadores.

Los capítulos incluyen actividades, ejemplos y casos prácticos con el propósito de facilitar la asimilación de los conocimientos tratados.

Así mismo, se incorporan test de conocimientos y ejercicios propuestos con la finalidad de comprobar que los objetivos de cada capítulo se han asimilado correctamente.

En la página web de **Ra-Ma** (**www.ra-ma.es**) se encuentra disponible el material de apoyo y complementario.

9 788499 640983

ra-ma.es

Ra-Ma®